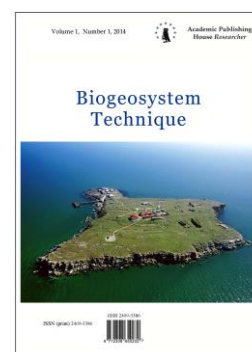


Copyright © 2020 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
Biogeosystem Technique
Has been issued since 2014.
E-ISSN: 2413-7316
2020, 7(1): 3-37

DOI: 10.13187/bgt.2020.1.3
www.ejournal19.com



Improved Methodology for the Analysis of Space Information on the Solar Energy Absorption by Terrestrial Ecosystems

Leonid V. Berezin ^{a,*}

^a Omsk State Agrarian University, Russian Federation

Paper Review Summary: Received: 2020, February 9

Received in revised form: 2020, June 23

Acceptance: 2020, June 29

Abstract

The article outlines the satellite images using principles by the solar radiation full spectrum absorption analysing, including both the near and middle infrared ranges, which can currently be used by any land users. Since 1980, American researchers A. Gitelson et al. and P.S. Thenkabail et al. began to use the methodology based on the laboratory spectrometers studying of the plants leaf apparatus area, the water content, as well as for the chlorophyll and other components in plants. Very important result was a wheat rust (*Puccinia*) remote diagnosis. Since 2010, they began to install the devices on unmanned aerial vehicles, and then on airplanes. In 2015-2017, American researchers, together with Indian scientists, conducted a survey using the above-mentioned technique to separate the annual and perennial field crop sections in several regions of India. German researchers applied the same technique to study the system of wheat fertilizer application.

Already in 1980, the Russian scientists at Omsk State Agrarian University substantiated the possibility of studying the abovementioned issues, but using standard satellite imagery. Since 2004, the Russian scientists at Omsk State Agrarian University began to use their sophisticated analysis by image clustering in various natural zones of the Middle Priirtyshye. It was found that the most informative is the mid-infrared range of the solar radiation spectrum. This makes it possible to distinguish the field crops and soil types differences. At the same time, the possibility of the automorphic and hydromorphic agroecosystems state diagnosing was established. Both when used in field crop rotation and in a fall state. The factors were determined of the feasibility and priority of the arable lands re-development into arable land.

Keywords: satellite imagery, solar radiation, spectral analysis, solar energy absorption by ecosystems, fallow land re-development.

1. Введение

Уже в средние века ученые мечтали изучить эффективность использования космической энергии. Но лишь в 1687 году, после разложения солнечного луча с помощью призмы, Ньютон первым сделал теоретические расчеты поступления на Землю солнечной энергии.

* Corresponding author

E-mail addresses: docberezin@yandex.ru (L.V. Berezin)

В середине XVIII в русский ученый М.В. Ломоносов, изучив процесс производства цветного стекла, доложил в Академии Наук России теорию света и цвета, достаточно близкую к современному пониманию светоотражения солнечной радиации (Ломоносов, 1957).

Последняя четверть восемнадцатого века была отмечена весьма активной деятельностью во всех отраслях человеческой мысли, возникли новые направления фундаментальной науки, такие как современные химия, астрономия, ботаника и биология.

Благодаря трудам М.В. Ломоносова (1763), Н. Helmholtz (1854), R. Meyer (1845, пер. 1933) и других, наступил период пересмотра взглядов на природу.

Менее известны работы J. Senebier (1782), евангелистического пастора и естествоиспытателя. В 1772 году в Женеве вышел первый из трех томов, где были представлены результаты многочисленных опытов J. Senebier, в которых он показал действие света на растения. В следующем году вышел новый том. В нём было представлено открытие, которое сделало славу J. Senebier. Он первым доказал, что растения «питаются воздухом». Научные предшественники J. Senebier лишь отмечали, что растение очищает атмосферу, он же, по словам К.А. Тимирязева, «показал другое и гораздо более важное его значение: процесс этот питает растение, а через растение и весь животный мир. Не произнося слова «углерод», J. Senebier открыл самый факт его круговорота» (Тимирязев, 1948).

Настоящую революцию в познании взаимосвязи энергетики Солнца и жизни на Земле сделал в 1903 г. доклад русского ученого К.А. Тимирязева в Лондонском королевском обществе (Timiryazev, 1903). Его 30-летние исследования процесса фотосинтеза растений показали как происходит преобразование солнечной энергии при разложении углекислоты атмосферы и образование в растениях органического вещества, которое дает в итоге жизнь всем существам на Земле. Ещё до этого доклада, К.А. Тимирязев (1890) показал различия в поступлении на Землю солнечной энергии разных компонентов спектра радиации, доказав ошибочность сложившихся к тому времени взглядов на важнейшую роль наиболее яркой желтой части спектра, тогда как основным носителем энергии Солнца является длинноволновая красная его часть. Этот показатель яркости светоотражения изучаемого объекта описывают следующей формулой:

$$V = \max(R, G, B),$$

где V яркость пропорциональная общей величине светоотражения изучаемого объекта (Glow).

При компьютерной обработке изображения с космических снимков этой величине соответствуют градации «серого». Эти градации используются практически во всех публикациях о дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) в черно-белом варианте. При теоретическом анализе оптимального соотношения отражения-поглощения показатель Glow обеспечивает взаимосвязь коротко- и длинноволнового (Red/Blue) компонентов солнечного спектра.

В докладе «Космическая роль растений» К.А. Тимирязев (Timiryazev, 1903) дал научное обоснование процессу фотосинтеза и соотношению поглощенной растениями солнечной энергии на создание органического вещества (около 1–5 %) и транспирацию растениями почвенной влаги (до 95 %). Эти теоретические разработки стали научной основой физиологии растений, а также селекции растений и борьбы засухой.

Через 50 лет после знаменательного доклада К.А. Тимирязева, академик В.Р. Волобуев (1974) в течение 20 лет изучал энергетику данного процесса, определив одновременно и поглощение необходимой энергии на образование нового органического вещества «из воздуха» и энергетику формирования плодородия почвы при разложении органического вещества, накопленного в период вегетации растений. Было установлено, что интенсивность формирования органического вещества находится в прямой зависимости от интенсивности солнечной радиации в каждом регионе Планеты. Больше того, впервые было экспериментально доказано, что опосредованное растениями накопление солнечной энергии в почве определяется интенсивностью биологических процессов образования органического вещества. Наибольшие значения относительной величины интенсивности биологических процессов приурочены к тем климатическим условиям, которые типичны для черноземов, желтоземов, коричневых почв, красных почв саван, тропических

красноземов, т.е. именно тех почв, которые характеризуются большой активностью биологического круговорота. По мнению В.Р. Волобуева (1974), полученные им результаты расчетов «полезны для целей исследования условий гумусообразования. Однако прямой корреляции между гумусообразованием и относительной величиной биологической энергии и почвообразования нет». Согласно его расчетам количеств энергии, запасенной в гумусе среди рассмотренных типов почв, «резко выделяется чернозем – 20 000 кал в призме почвы сечением 1 см² мощностью 0–300 см. В других почвах запасы энергии в гумусе в том же объеме составляли от 4000 до 8000». При этом в красноземе влажном тропическом, на котором формируются самые продуктивные тропические леса, оказалось лишь 9 280 кал, а в сухостепной каштановой почве, где продуктивность степной растительности крайне мала, лишь немного меньше – 8000 кал.

Это, казалось бы, противоречие обусловлено тем, что растения на черноземе сохраняют основную часть накопленной энергии в корневой массе, а в тропических лесах синтезированное органическое вещество остается преимущественно в наземной массе и после отмирания растений и их частей опад практически полностью минерализуется. Роль опада в накоплении биомассы почвы здесь меньше, чем черноземах и каштановых почвах. В результате накопленная растениями энергия, по существу, возвращается обратно в космическое пространство. Высокая продуктивность красноземов, наблюдается лишь после освоения целины, поскольку в этих почвах имеется легко разлагаемое органическое вещество (ЛОВ). Но уже через 2–3 года продуктивность почвы резко снижается ввиду исчерпания ЛОВ. Гуминовых синтезированных соединений, определяющих плодородие почвы в долгосрочной перспективе, в этих почвах крайне мало. Содержание гуминовых веществ здесь близко к подзолистым почвам Северной части Евразии.

Необходимо отметить, что расчеты В.Р. Волобуева базировались на косвенных показателях, и основывались лишь на поглощении солнечной энергии растениями при фотосинтезе. К.А. Тимирязев и В.Р. Волобуев разными путями установили, что данная величина составляет только 0,5–5 % солнечной энергии, поступающей в наземные экосистемы. А как распределяются остальные 95 % солнечной радиации? Тимирязев высказал гипотезу, что эта энергия расходуется на транспирацию влаги растениями. В.Р. Волобуев этот вопрос не рассматривал. Многие учёные полагали, что энергия Солнца в основном поглощается мировым океаном, обуславливая течения и прогревая воды на большую глубину. Но для решения региональных проблем земледелия и почвоведения требовалось не косвенное, а прямое определение влияния солнечной энергии на самые различные земные процессы (Bower, Hanks, 1965; Birth, McVey, 1968; Chen et al., 2005; Clark, 2003; Friedl, Brodley, 1997; Yonezawa, 2007). Возможности для решения данных задач отсутствовали до конца XX в.

Лишь в последней четверти истекшего века с целью дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на орбиту были выведены сотни космических аппаратов (КА) – искусственных спутников Земли. В первой четверти XXI века в космическом пространстве Земли работают, по информации компании Совзонд, 2700 КА. Первое поколение специализированных национальных космических систем природно-ресурсного направления было представлено системами: Ресурс (СССР), Landsat (США) и SPOT (Франция). За прошедшие полвека регулярно запускаемые КА этих систем многократно покрыли съемками всю Планету (Aguilar, 2012; Aguilar et al., 2012; Ashton, Van Der Meer, 2004; Barker et al., 2004; Green et al., 1988).

По анализу снимков стало возможным улучшить технологию картографирования почвенно-растительного покрова, определять площади возделывания сельскохозяйственных культур, делать ориентировочный прогноз их урожайности, выявить площади земель, выведенных из сельскохозяйственного использования, определить состояние лесных насаждений и затопляемых территорий (Айрапетян и др., 2011; Андроников, 1976; Баррет, Куртис, 1979; Березин, 2010; Болсуновский, 2009; Кравцова, 2005; Gamon et al., 1992; Green, 1998; Huete, 1997; Ozdogan, Woodcock, 2006).

Космические снимки в XXI в. стали использоваться для выявления факторов, лимитирующих продуктивность пахотных земель, определяющих процессы формирования урожая (Березин, 2006; Березин, Сергеева, 2007; Виноградов, 1990; Гопп и др., 2008; Сергеева, Березин, 2006).

Но задолго до столь эффективного использования космической информации ученые разных стран с помощью лабораторных спектрометров начали изучать спектральную отражательную способность различных растений и почв. Наиболее значительные работы выполнили коллективы российских ученых, возглавляемые Ю.С. Толчельниковым (1974) и В.И. Савичем (2005). Значительный вклад в разработку проблемы внесли ученые из США А.А. Gitelson et al. (2002a, 2002b), P.S. Thenkabail et al. (2004), и другие научные школы. При этом основное внимание уделялось анализу изменения соотношения компонентов видимой световой части спектра солнечной радиации: Red/Blue и Green/Blue.

М.А. Hardisky et al. (1983) начали изучение влияния засоления почвы на спектральную отражательную способность и темп роста листьев разных культур при различном содержании влаги в тканях растения. Многие американские, а также немецкие специалисты с 1980 г. пытались этим же лабораторным методом определять показатели продуктивности растений, содержание в листьях влаги, хлорофилла и других веществ, включая пигменты (Curran et al., 1993; Peñuelas et al., 1994; Jacquemoud, 2009; Jacquemoud et al., 1995; Asner, Martin, 2008; Meerdink et al., 2016; Rouse et al., 1974; Sims, Gamon, 2002; Turner et al., 2004). Поскольку полученные результаты показывали различный спектр отражения в семи основных зонах видимой части светового спектра, применяемый метод получил название «многозональный анализ». При дополнительном учете отражения в ближней части инфракрасного канала стали использовать термин «мультиспектральный анализ».

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении позволило P. Thenkabail et al., (2004) и P. Zarco-Tajada et al. (2013) начать дистанционное изучение спектра отражения наземных экосистем: почв и растительности. Публикации P. Thenkabail et al. (2004) и А.А. Gitelson (2011) и ряда других исследователей сообщали, что с помощью спектрорадиометров, установленных на беспилотных летательных аппаратах, а с 2016 г. – и на самолетах, удалось добиться весьма узкой ширины диапазона спектра съемки менее 10 нм.

Такой метод изучения узких полос спектра в зависимости от динамики развития растений и состояния окружающей среды получил название гиперспектральной съемки (Chen et al., 2014). Ю.Ф. Книжников и др. (2011) отмечают, что в отличие от обычных широкополосных (200–300 нм и более) многозональных снимков, гиперспектральные снимки позволяют получать детальные почти непрерывные кривые значения спектральной яркости объектов. Поэтому потенциальная информация, заключенная в гиперспектральных снимках, позволяет не только классифицировать изображения, но и определять многие биогеофизические характеристики объектов (Kussul et al., 2017). Таким же путем реализации метода аэросъемки, но с использованием спектроскопов для гиперспектрального анализа снимков, пошли и немецкие, и индийские коллеги.

Значительные успехи немецких исследователей (Kanning et al., 2018) были достигнуты при изучении эффективности минеральных и органических удобрений. С целью вскрыть факторы, определяющие уровень продуктивности зерновых культур, установив на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) специализированный спектрофотометр, группа исследователей трех научных учреждений определила индекс развития листовой массы LAI и содержание в листе хлорофилла CHL. Прогноз концентрации хлорофилла CHL (Рисунок 1) для разных вариантов условий развития растений был в целом более отчетливым, чем для индекса листовой поверхности LAI. Была показана заметная неоднородность показателей на участках одного и того же уровня удобрения почвы.

Самые слабые прогнозы CHL (0–20 мг/см²) были получены для проходов между экспериментальными участками, где отсутствовала растительность. Значения больше нуля здесь были обусловлены смешением спектров от соседних пикселей. Значения примерно между 20 и 40 мг/см² в основном получены на контрольных участках № 3, 17 и 21 без дополнительного внесения удобрений.

Урожайность была немного выше (до 40 ц/га) в варианте внесения азотного удобрения 50 кг/га участка (9 и 14). Участки с внесенным азотных удобрений 100 кг/га обеспечили урожайность зерна около 60 ц/га.

Более высокая доза минеральных удобрений 125 кг/га (участки № 1, 6 и 8) и органических удобрений 125 кг/га (участки № 5, 7 и 13) обусловила четкие различия в оценке урожайности зерна. Это также было заметно при дозе удобрения 141 кг/га, где

урожайность зерна была высокой. Максимальная величина оценки урожайности при дозе удобрения 150 кг/га составила 80 ц/га (делянки № 10, 23 и 24).

При этом высокий уровень содержания хлорофилла CHL (40–60 мг/см²) был предсказан при внесении в почву минеральных и органических смесей из расчёта 141 кг/га (участки № 2, 18 и 20). Там, где вносили 125 кг/га комбинированного минерального и органического удобрения (участки делянки № 5, 7 и 13), значение CHL было меньше чем при тех же количествах исключительно минерального удобрения (участки № 1, 6 и 8). Самый высокий уровень CHL (> 80 мг/см²) был предсказан для участков, где вносили 125, 141 и 150 кг/га удобрений. Показатель CHL заметно увеличивался в этом же порядке.

На некоторых участках (делянках) с одинаковым уровнем удобрения были выявлены различия в зависимости от их местоположения участка в пространстве почвенного покрова под экспериментом (например, участки № 11 и 12 против 22).

Учет полученного на экспериментальных участках зерна показал, что, как и ожидалось по прогнозу экспериментальных данных, полученных по анализу содержания хлорофилла, увеличение урожайности имело место в вариантах с более высокой нормой внесения удобрения.

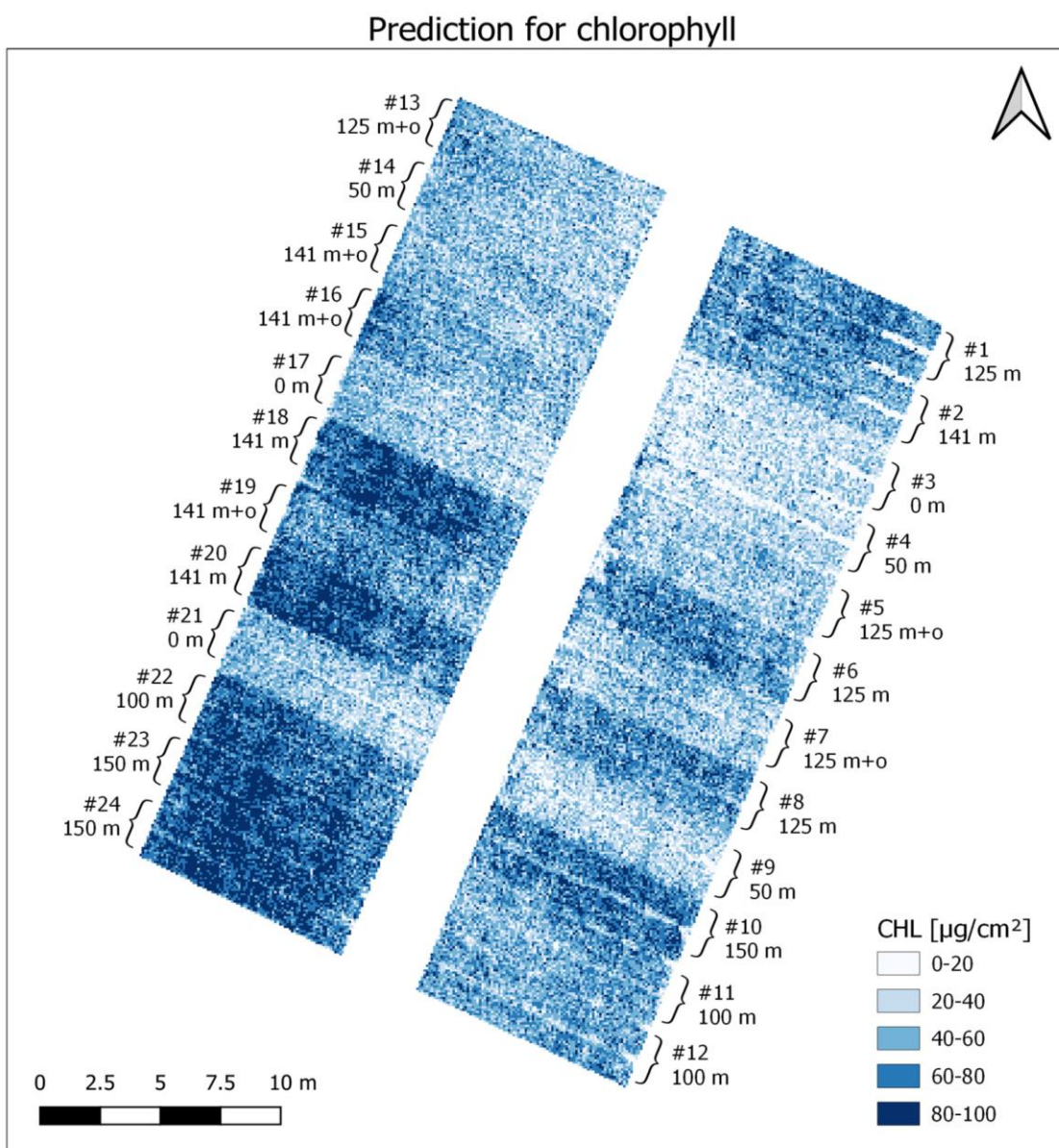


Рис. 1. Прогноз CHL на основе модели PLSR (Kanning et al., 2018)

Впервые на больших территориях гиперспектральную съемку выборочно по заданным контурам применили индийские ученые совместно с учеными США при съемке полей в ряде штатов Индии. Исследования показали резервы повышения урожайности пшеницы, сахарного тростника, подсолнечника, бананов, сахарной свеклы и виноградников (Nigam et al., 2019).

Глубокие исследования спектральной отражательной способности растений методом гиперспектрального анализа, проведенные в Индии, на крайнем Юге Евразии, показали, что гиперспектральный анализ снимков по материалам аэросъемки обеспечивает большую информативность и повышенную точность картографирования земельных фондов при одновременном снижении затрат на проведение полевых работ по сравнению с анализом лишь видимой части диапазона спектра радиации.

Результаты поисковых лабораторных исследований с получением снимков с высоты птичьего полета показали хорошие возможности применения новых методов ДЗЗ в интересах землепользователей в любое время года для оперативного контроля состояния посевов.

В настоящее время в практике ДЗЗ сельскохозяйственного назначения применяют КА высокого разрешения 10 м/пикс и даже сверхвысокого при детальности съемки до 1 м/пикс. При этом почти все современные КА могут проводить лишь мультиспектральную съемку в диапазоне солнечной радиации до 900 нм, максимум до 1300 нм.

Практическое использование гиперспектрального анализа при космической съемке стало возможным только с 2015 г., когда на орбиту Земли был запущен первый спутник серии Sentinel-2A. В 2017 г. был запущен второй спутник Sentinel-2B (Clark, 2017). Эти КА имеют спектральную полосу 430–2190 нм при уникальном разрешении снимков одновременно в трех вариантах: 10, 20 и 60 м/пикс. Это обеспечивает применение гиперспектрального анализа в широкой практике сельскохозяйственного производства и, в первую очередь, в интересах точного поконтурного земледелия.

Безусловно, любой новый метод требует доработки и совершенствования. В данной работе, проведенной в северо-восточной части Евразии, излагаются результаты изучения перспектив использования усовершенствованного полного анализа солнечного спектра при проведении ДЗЗ КА, обеспечивающего совершенствование методики ДЗЗ и методологии анализа состояния земельных фондов Планеты Земля.

Полученные американскими исследователями совместно с учеными Индии весьма ценные результаты послужили поводом использовать рассмотренный метод исследований и в экспериментальных работах, проведенных нами на опытных полях Омского аграрного университета. Они выполнялись по космическим снимкам объекта исследований с разрешением 10 м/пикс.

Задачи исследований:

Изучить возможность использования материалов ДЗЗ путем проведения анализа поглощения наземными экосистемами полного спектра солнечной радиации;

Предложить методику оперативного внесения изменений в агротехнологию в результате использования землепользователями космической информации об изменениях состояния почвы и возделываемых культур без использования сложных химических и иных анализов;

Обосновать методику использования космической съемки для выявления залежных земель и определения очередности их повторного освоения в пашню.

2. Материалы и методы

Задачи, область исследования и образцы

Работы были выполнены в границах степной и лесостепной зернопроизводящей зоны Юга Западной Сибири.

Специфика зоны определяется, с одной стороны, равнинным характером территории, а с другой стороны, резко выраженным континентальным климатом. Зона отличается равнинным характером территории с преобладанием микрорельефа (Горшенин, 1928, Горшенин, 1955; Климат Омска, 1980).

Зима длительная и морозная, в результате глубина промерзания почвы в лесной зоне составляет 0,8–1,2 м, а в степной достигает 2–3 м.

Весеннее оттаивание почвы сверху вниз вызывает формирование почвенной верховодки (Юшкевич, Березин, 2001). Верховодка в сочетании с высокорасположенным крупнейшим в мире артезианским бассейном способствует высокому засолению и солонцеватости почвы. Увлажнение почв весьма неравномерно по годам, и обычно недостаточно для полноценного развития растений по общему уровню, и особенно по сезонам вегетационного периода. В результате короткого и жаркого засушливого вегетационного периода урожайность полевых культур существенно ниже, чем в Европейской северной части Евразии. Но благодаря продолжительности солнечного сияния соответствующей южному берегу Черного моря и центральной части Италии, обеспечивается высокое качество зерна, картофеля, овощей и фруктов.

Территория отличается преобладанием сложных почвенных комплексов. Изучение светоотражения солнечной радиации и поглощения экосистемами существенной части её энергии проводилось на основных типах почвенных комплексов.

Исследования сибирских почвоведов были направлены на изучение целесообразности применения гиперспектрального анализа при дешифрировании материалов ДЗЗ для исследования характера использования земельного фонда, в частности, для обоснования ландшафтно-мелиоративной системы земледелия (Landscape-reclamation system of agriculture = LRSA) (Березин, 2012; Berezin 2014, 2015). Будучи основанной на принципах Precision agriculture, система LRSA обеспечивает реальную возможность рационального использования в пашне не только плодородных, но и «тощих» почв. Напомним, что «разумное использование» любых по плодородию почв рекомендовал ещё во времена Юлия Цезаря римский учёный-энциклопедист и писатель, автор трёх книг по сельскому хозяйству М.Т. Варрон (Marcus Terentius Varrō, 116-27 гг. до н.э.) (1963). Различая около 300 почвенных разновидностей, он считал это количество недостаточным, учитывая дефицит плодородных почв Италии и прилегающих государств, завоеванных Римской империей.

Исследования проводил коллектив почвоведов лаборатории рационального использования почв при кафедре агрохимии и почвоведения Омского аграрного университета – доцентами, аспирантами и студентами.

В качестве основных исходных материалов для решения задачи оценки состояния земельных ресурсов и плодородия почвенного покрова использовали снимки с КА США среднего разрешения Landsat-7 и Landsat-8, а также с КА высокого разрешения ALOS (Япония) и RapidEye (Германия) (Березин, 2012).

В целях анализа спектра отражения при изучении действия минеральных удобрений при возделывании пшеницы, наблюдения динамики созревания зерновых культур и светоотражение почвенных горизонтов разных почв солонцового комплекса применяли цифровую фотокамеру со светофильтрами.

Анализ космических снимков проводили в основном с использованием программных комплексов ENVI 5.2 и Adobe Photoshop 3.0 (Березин, 2011). При дешифрировании спектра отражения полученных наземных снимков, наряду с космическими снимками состояния экосистем, использовали программный комплекс Adobe Photoshop. Основное внимание уделяли определению интенсивности показателя Glow, то есть, «свечению» – яркости светоотражения почвенных и растительных образцов и агроэкосистем (Березин, Чемерилова, 2008а, Березин, Чемерилова, 2008б). При использовании программного комплекса ENVI применили методику кластеризации элементарных ареалов экосистем на основе учета специфики их светоотражения (Шахметов и др., 2014).

Полевые работы были выполнены в период с 2004 по 2019 гг. в целях исследования возможностей использования земельных фондов отдельных КФХ или муниципалитетов. Сопоставляли космические снимки Landsat-7 за 1992 г. и Landsat-8 за 2017 г. одних и тех же территорий. При контроле подтопления земель сопоставляли осенние и весенние снимки в пределах одного сезона с обработкой материалов по программному комплексу SWAR (Клейн, Березин, 2017).

Методология

Методологической основой работ был анализ элементов множества, образующих систему взаимосвязи солнечной радиации и почвенно-растительного покрова, в т.ч. впервые использован категориально-системный подход методологического анализа, позволяющий

вскрыть внутренние причины динамичности изучаемых закономерностей отражательной способности почвенного покрова (Разумов, 2004).

Методология исследования состояния земельных фондов определялась специфичностью проблемы изучения космической информации и актуальностью разработки новой системы земледелия на обширных равнинных территориях с преобладанием в пашне сложных почвенных комплексов. При оценке информативности дешифрируемой космической информации основным был принцип изучения поглощения изучаемыми объектами энергии солнечной радиации. В этом случае исследование отражательной способности изучаемых объектов, широко применяемого в современных условиях при использовании космической информации, играло вспомогательную роль.

Показатели отражательной способности почв и возделываемых культур, зависящие от особенностей ландшафта, системы обработки почв и структуры севооборота, а также интенсивности деградационных эрозионных процессов, характеризуют не столько индивидуальную особенность интенсивности светоотражения компонентов экосистемы, сколько взаимозависимость поглощения солнечной радиации контрастно различающихся компонентов почвенных комплексов.

Еще в 1915 г. основатель кафедры почвоведения Омского института сельского хозяйства С.С. Неуструев (1931), развивая учение В.В. Докучаева (1883), показал, что почвенный покров любого региона наиболее существенно характеризуется не столько составом преобладающих типов почв, сколько комплексностью почвенного покрова.

Это предполагает существенную зависимость его продуктивности, в равной мере, как от наличия плодородных почв, так и почвенных разностей, лимитирующих продуктивность биогеоценозов. Позднее, уже работая в Сибири, С.С. Неуструев также доказал влияние на процесс эволюции почвенных комплексов тех или иных регионов деградационных процессов, вызванных влиянием водной и ветровой эрозии почв, снижающих продуктивность земель сельскохозяйственного назначения.

Проблемы, возникшие в современной сфере производства продукции сельского хозяйства на фоне социально-демографических проблем, вызвали необходимость дополнения сложившихся в аграрной науке методологических принципов. Современные задачи рационального использования экосистем привели к необходимости использования новых философских принципов методологии планирования и проведения научных исследований, предложенных профессором В.И. Разумовым (2004). Среди них на первый план выходит принцип рационального использования всех материально-технических ресурсов, учитывая постоянно сокращающуюся вследствие объективных природных и антропогенных причин площадь пахотных земель Планеты. В частности, обострилось противоречие между реальным состоянием земельных фондов, которое хорошо фиксируется при анализе оперативной космической информации, и быстро устаревающей их кадастровой оценкой, на которой основаны не только земельный налог, но и условия лизинговой политики государства, как и прочие варианты обоснования и расчёта размера субсидий сельскохозяйственным товаропроизводителям. К сожалению, современная кадастровая оценка почв России не учитывает плодородия почв, приравнивая земельные участки к общим требованиям объектов недвижимости.

Дополнительно был раскрыт маятниковый тип механизма взаимосвязанных, с одной стороны, позитивных мелиоративных изменений свойств мелиорируемых почв низкого плодородия и, с другой стороны, неизбежных негативных процессов реставрации сформировавшихся веками природных особенностей этих почв (Сергеева, 2007а; Сергеева, 2007б; Гиндемит, 2007а; Сергеева, Гиндемит, 2010; Сергеева и др., 2010).

В результате взаимодействия этих процессов, как показали предшествующие многолетние (30–50 лет) исследования почвоведов Омского аграрного университета и Пермского госуниверситета, проведение химической мелиорации малоплодородных почв не может стать радикальным приемом качественного преобразования земельного фонда аграрных предприятий. Независимо от технологии мелиоративных работ, неизбежна реставрация тех факторов генезиса почвы, которые ранее обусловили эволюцию данной почвенной разности, и эти факторы продолжают свое влияние, несмотря на антропогенное преобразование комплексных почвенных массивов (Еремченко, 1997; Семененко (Гиндемит), 2007б).

Особенно актуальным для сельскохозяйственного производства стал методологический принцип систематического внесения кардинальных поправок в ранее принятые технологические решения на основе использования оперативной космической информации о состоянии используемых и мелиорируемых земель.

Сибирскими почвоведомы было установлено, что системной определяющей методологической категорией изменения свойств почв в мелиорируемом агроценозе можно считать состояние почвенных процессов. Оно направляет и, одновременно, характеризует свойства и особенности состояния генетических горизонтов компонентов почвенного комплекса и их изменение при мелиоративных воздействиях (Воропаева, 1982; Березин, 2013; Березин и др., 2008, 2013; Семендяева и др., 2017).

Новые методологические принципы были применены М.Р. Шаяхметовым при теоретическом обосновании разработки основ ландшафтно-мелиоративной системы земледелия (Шаяхметов, Березин, 2012). Алгоритм анализа ландшафтно-мелиоративной системы земледелия, представленный на рисунке 2, который определяет механизм использования предложенной нашим коллективом системы земледелия, обеспечивающей совершенствование современной агротехнологии. Он основан на синтезировании методологических принципов адаптивно-ландшафтной (АЛСЗ) и ландшафтно-экологической (ЛЭСЗ) систем земледелия на базе космической информации (1) с целью развития экстенсивных и современных типов хозяйств и перехода от этих форм к интенсивным методам землепользования с минимальными экономическими затратами (3).

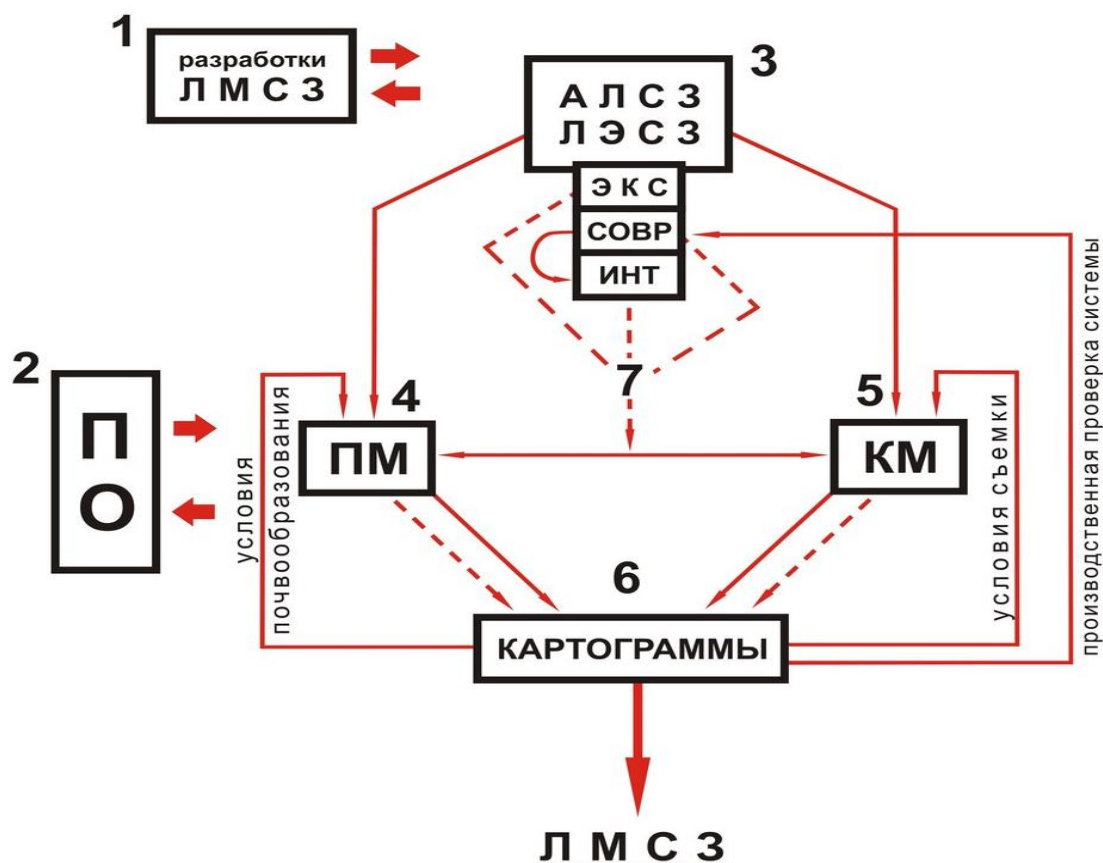


Рис. 2. Алгоритм ландшафтно-мелиоративной системы земледелия

Примечания: ЛЭСЗ – ландшафтно-экологическая система земледелия; АЛСЗ – адаптивно-ландшафтная система земледелия; ЛМСЗ – ландшафтно-мелиоративная система земледелия; Экс – экстенсивное хозяйство; Совр – современное хозяйство; Инт – интенсивное хозяйство; ПО – программное обеспечение; ПМ – почвенные материалы; КМ – космические материалы.

В плане теоретического совершенствования методики анализа материалов космической информации о состоянии агроэкосистем в различных условиях микро- и мезорельефа нами предложен принцип прямого анализа поглощения солнечной радиации изучаемыми объектами без построения цифровой модели рельефа (Шаяхметов и др., 2014; Березин, 2013; Березин, 2015). На базе цифровой модели рельефа (ЦМР) проводят почвенное картографирование большинство почвоведов мира (Singh, Herrison, 1985; Melgani, Bruzzone, 2004; Clark, 2017).

Используя ЦМР, обычно ссылаются на труды классика почвоведения В.В. Докучаева (1883), который показал прямую связь свойств почв с их положением в рельефе. Но при этом не следует забывать, что рельеф, по Докучаеву, лишь один из нескольких факторов почвообразования. Он, безусловно, влияет на формирование почвенных разностей, но их прямая связь может проявляться лишь при прочих равных условиях сравнения.

Отказ от методики косвенного изучения почвенного покрова в наших исследованиях имел целью использование новой методики дешифрирования космоснимков с использованием методики кластеризации на этапе определения поглощения элементов спектра солнечной радиации компонентами почвенных комплексов. Для этого по снимкам изучаемых биogeосистем, полученным одновременно в разных диапазонах спектра, на массивах, расположенных в одинаковых позициях мезорельефа, выделяли в составе почвенного комплекса все элементарные ареалы изучаемой экосистемы, группируя их в классы по степени светоотражения.

Определяя с высокой точностью местонахождение (географические координаты) и отличительные особенности компонентов почвенного комплекса каждого класса, получали, расчётную величину разности фактического светоотражения элементов спектра отдельных компонентов изучаемых экосистем и величины стандартного максимально возможного в данных условиях светоотражения (255 условных единиц). Эта величина, на первый взгляд, представляется кажущимся произвольно выбранным показателем, но в действительности она обоснована требованиями формирования цветowych снимков.

По Книжникову (2011), для представления цветowych снимков требуется 24 бит (3 байта) видеопамати для каждого из пикселей. На каждый из трех минимально необходимых основных цветов (RGB: red-green-blue, красный-зеленый-синий) приходится по 8 бит, что позволяет хранить $28 = 256$ (от 0 до 255) различных значений яркости изучаемых объектов, хотя глазом четко различимы лишь 200 возможных цветowych оттенков.

Учитывая расчеты, проведенные Книжниковым (2011), нами определялась величина поглощения солнечной радиации каждого специфического ареала: отдельной почвенной разности, варианта системы удобрений или поражения посева вредителями или болезнями и т.п. по разнице между фактическим и стандартным максимально возможным светоотражением (255 условных единиц) экосистем в момент космической съемки, независимо от местонахождения объекта, времени съемки и погодных условий (Березин, Шаяхметов, 2018).

Установленные особенности светоотражения каждого класса данных позволяют обосновать различия в агротехнологии по ареалам компонентов комплексности на территории изучаемой экосистемы, либо на всей площади почвенного комплекса. По итогам анализа компонентов комплексности изучаемых экосистем составляли картограммы дифференциации различных элементов агротехнологии для каждого сезона полевых работ. В Венгрии такие картограммы создаются специалистами агрохимической службы уже с 80-х годов истекшего XX в. на основе полевого обследования полей и результатов химического анализа почвенных образцов. Для каждого полевого сезона все хозяйства получают необходимые картограммы применения удобрений и обработки почвы для внесения поправок в технологические карты возделывания полевых культур.

В целях широкого использования разработанной нами методики, совместно со специалистами Омского Агрохимического Центра, разработан и защищён патентом алгоритм нового способа агрохимического обследования почв на основе анализа спектра отражения каждого земельного массива по материалам оперативной космической информации (Березин и др., 2016).

3. Результаты и обсуждение

Для выявления роли применяемых систем земледелия на фоне очередного глобального повышения увлажнения лесостепной зоны сибирского региона нами использовались в основном снимки КА Landsat за период с 1992 по 2018 г.

Согласно полученным результатам, по сравнению с периодом 1970–1990 гг., в лесостепной зоне на междуречных территориях Ишим–Иртыш и Иртыш–Обь в настоящее время в сельском хозяйстве региона практически прекращено использование значительной части пахотных земель. Этим методом показано, что применение ДЗЗ является наиболее оптимальным путем выявления залежных, ранее использовавшихся земельных массивов для подготовки их повторного освоения.

На [Рисунке 3](#) приведено изображение территории одного из муниципальных объединений, расположенных по Левобережью Среднего Прииртышья на высоте менее 80 м над уровнем моря, территория которого в последние 5 лет подвергалась существенному подтоплению.

Путём наложения снимков разного срока по методике предложенной аспиранткой Н.А. Клейн ([Клейн, Березин, 2017](#)), можно выявить земельные массивы, выведенные из обработки за прошедшие годы. Методика полезна как для землепользователей, так и в землеустройстве.

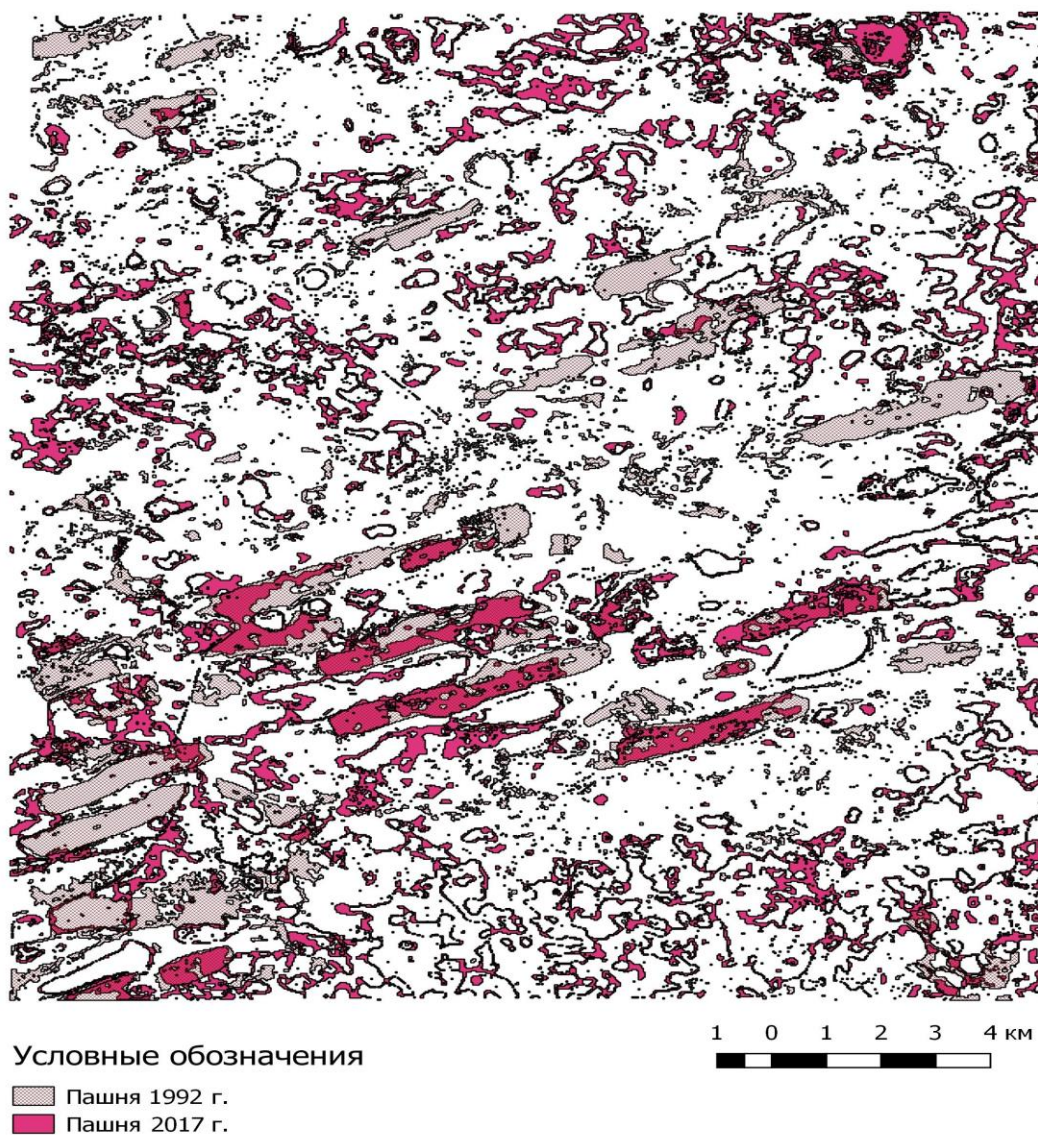


Рис. 3. Изменение площади пашни в типичном хозяйстве северной лесостепи Среднего Прииртышья, вследствие перевода подтопляемой пашни в залежное состояние

Обычные синтезированные космические снимки, будучи просто фотографией, не отражают искомого качества изображенного на снимке объекта. Применение усложненной методики в ряде хозяйств Омской области методом кластеризации синтезированных снимков программного комплекса ENVI 5.2 позволило провести дифференциацию очередности их повторного освоения.

На **Рисунке 4** приведены снимки залежных массивов одного из вновь образованных хозяйств, расположенного в той же зоне, но по Правобережью Среднего Прииртышья в условиях в автоморфного водного режима. Иная картина сложилась на залежных массивах по Правобережью Среднего Прииртышья в условиях в автоморфного водного режима.

Сопоставление комплексности залежных земельных массивов в данных условиях по составу компонентов экосистем показало их резкие различия между собой, хотя они расположены в одинаковых ландшафтных условиях на высоте 117–125 м над уровнем моря. Территория хозяйства расположена на повышенной части равнины среди небольших березовых лесков – «колков».

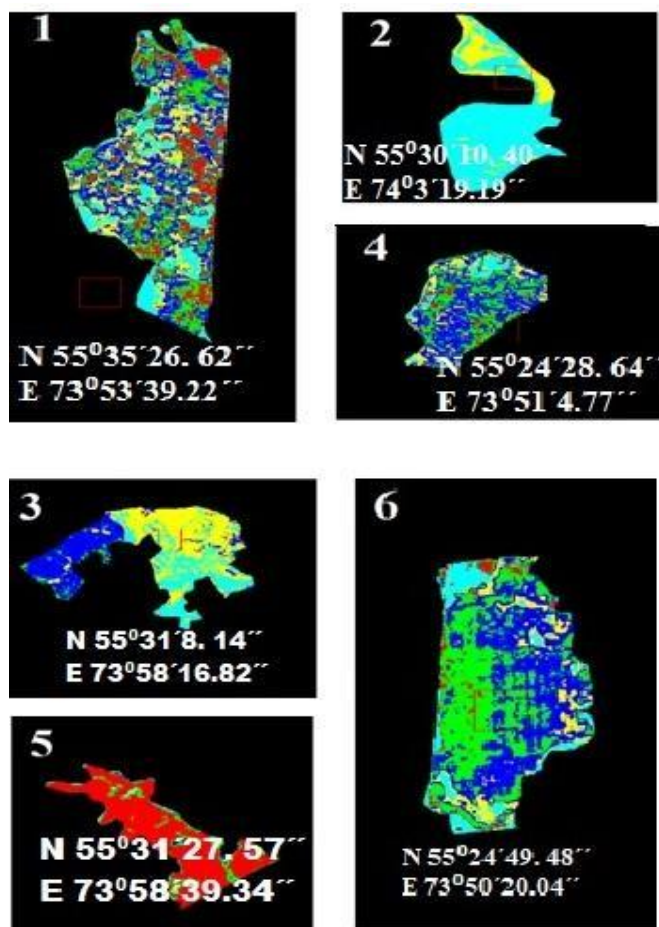


Рис. 4. Разнообразие залежных массивов по качеству почвенных комплексов Правобережья Среднего Прииртышья

Массивы 2 и 5 характеризуются относительной однородностью почвенного покрова по величине поглощения солнечной радиации, хотя согласно полевого обследования наблюдаются, казалось бы, существенные различия по свойствам почвы и составу растительного покрова. Эти массивы целесообразно осваивать в первую очередь.

Массивы № 1, 4 и 6 отличаются крайне высокой сложностью структуры почвенного покрова, которая практически исключает возможность дифференцированного использования современной широкозахватной сельскохозяйственной техники с учетом плодородия элементарных компонентов почвенного комплекса. Эти массивы в ближайшие годы не целесообразно повторно осваивать в пашню.

Наиболее типичной для пашни Барабинской зоны в междуречье Иртыш–Обь является экосистема, представленная на массиве № 3. После полевого уточнения признаков почвы, было установлено, что в центре данного массива есть участок черноземной почвы, и хотя местами встречаются пятна солонца коркового, в основном массив занят солонцами мелкими.

Статистический анализ элементарных участков космических снимков, полученных КА RapidEye в пяти диапазонах по массиву № 3, проведенный по величине светоотражения ареалов на каждом из космических снимков, показал, что в диапазонах 1–3 видимой части спектра (диапазоны от синего (400 мкм) до красного – (600 мкм), величина показателя интегрального светоотражения составляла около 80 условных единиц. Эта величина составляет только 30–33 % от максимально возможного светоотражения (255 у.ед.). Следовательно, даже солонцовые биогеоценозы в залежном состоянии поглощают две трети солнечной радиации. Очевидно, этот весьма редко учитываемый факт позволяет понять механизм восстановления плодородия пахотных земель в залежном состоянии.

При использовании получаемых результатов, становится понятным, почему Тимирязев и Волобуев отмечали, что растения при фотосинтезе поглощают не более 5 % поступающей на Землю солнечной энергии. Не имея материалов космической информации ни они, ни современные исследователи, изучающие отражательную способность фитоценозов спектрофотометрами, не могут оценить долю поглощения компонентов солнечного спектра экобиогеоценозами, т.е. экосистемами в целом. Лишь сравнивая по снимкам светоотражение ареалов отдельных экосистем в границах ландшафтного массива, можно различить характер поглощения ими активной части солнечного излучения.

При сопоставлении результатов определения поглощения солнечной радиации экосистемами на черноземных и солонцовых почвах (массивы № 3 и 5), показанных на рисунке № 4, было установлено, что величина светоотражения на черноземном фоне (массив № 5, а тем более массив № 2) существенно меньше, чем на солонцовом фоне (западная часть массива № 3). Это свидетельствует о существенно большем поглощении черноземами длинноволновой части солнечного спектра, которая характеризуется повышенной насыщенностью энергией.

Были сделаны следующие выводы. Массив № 5 может быть восстановлен в системе полевого севооборота без значительных затрат на обработку и агротехнологию. Массив № 3 при повторном вовлечении в пашню нуждается в выборочном гипсовании при внесении различных доз гипса и его целесообразно распахивать во вторую очередь, при наличии условий для проведения химической мелиорации.

Следует обратить внимание на то, что величина светоотражения экосистем на черноземных почвах близка к нулевому значению, а поглощение дальней красной и инфракрасной части спектра радиации достигало 90 %.

Статистический анализ спектра светоотражения залежных массивов черноземно-солонцовых экосистем показал наличие четкой взаимосвязи диапазона космической съемки и величины параметров светоотражения при расчетах трендов линейной, экспоненциальной, полиномиальной второй и третьей степени аппроксимации.

Во всех вариантах расчета имела место существенная корреляция, коэффициент корреляции составил от 0,60 до 0,99. На основе полученных результатов был обоснован новый путь почвенно-агрохимического обследования земель сельскохозяйственного назначения, защищенный патентом РФ (Березин и др., 2016).

Полученные данные послужили обоснованием для изучения поглощения полного спектра солнечной радиации, включая его инфракрасную часть.

Ещё на первом этапе наших исследований (2004–2008), результаты усложненного анализа типичных для региона биогеоценозов по снимкам КА Landsat-7, проведенного аспиранткой О.С. Сергеевой (Сергеева, 2007а; Сергеева, 2007b; Сергеева, 2009; Сергеева, 2011), сопоставлялись с почвенной картой хозяйства 1989 г. отдельно по каждому диапазону спектра солнечной радиации: 450–515, 525–625, 630–690, 750–900, 1550–1750, 10400–12500 нм (Сергеева, Лысенко, 2004; Сергеева, 2009; Сергеева, 2011).

С целью изучения поглощения земными экосистемами солнечной энергии, экспериментально определялось светоотражение каждой экосистемы в полях севооборотов ОПХ Сибирского НИИ сельского хозяйства «Омское» на преобладающем фоне лугово-черноземной среднемошной почве – чернозем гидрометаморфизованный AU-BCAq-Csaq

(Классификация..., 2004). Как видно на Рисунке 5, коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) пшеницы и многолетних трав, и даже парового поля, в видимом диапазоне спектра солнечной радиации и в ближнем ИК-диапазоне существенно не различались.

Наиболее информативным для дешифрирования агрофитоценозов по космоснимкам оказался средний инфракрасный диапазон съемки (1550–1750 нм). В этом диапазоне даже на одной из лучших почвенных разностей сибирского региона проявляются существенные различия между светоотражением культур: многолетние травы – 47 %, пар – 35 %, пшеница – 53 %.

В парах лучшего по уровню агротехнологии хозяйства Омской области пары в этом диапазоне поглощают 65 % поступившей энергии солнечной радиации, а посевы полевых культур, практически в равной мере и поглощают, и отражают поступающую к экосистеме энергию солнечного спектра.

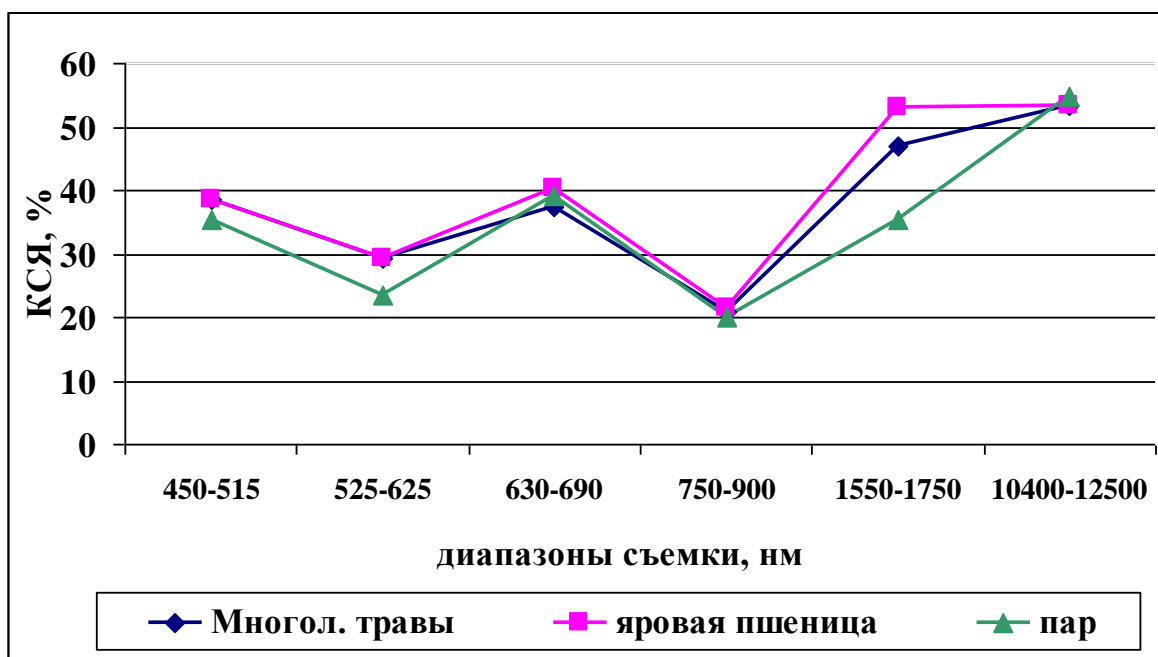


Рис. 5. Изменение коэффициента спектральной отражательной способности агроценозов на черноземных почвах в различных диапазонах съемки

Приведённые результаты не поддерживают рабочую гипотезу многих исследований о возможности по анализу видимой части спектра отражения той или иной культуры определить специфические биологические особенности культур и сортов. Это ещё раз подтвердило результаты исследований К.А. Тимирязева и В.Р. Волобуева, которые показали, что растения поглощают лишь около 1 % поступающей видимой части спектра солнечной энергии. Энергетика процесса фотосинтеза преобразования углекислоты в глюкозу, фактически, не зависит от биологии растения. Дальнейшая судьба образовавшегося органического вещества, безусловно, определяется биологией растительного организма, но при этом она не зависит от поглощения растением той или иной цветовой части спектра солнечного излучения.

Вместе с тем, известно, что физической основой распознавания почв на аэрофотоснимках является спектральная отражательная способность поверхностного горизонта почвы в видимом диапазоне спектра (Орлов, 1982; Орлов и др., 2001).

Определение светоотражения основных типов почв, занятых одной из основных культур лесостепной зоны Западной Сибири – яровой пшеницей, проводили сопоставлением данных космической информации о почвах агроэкосистем по каждому диапазону спектра (Рисунок 6).

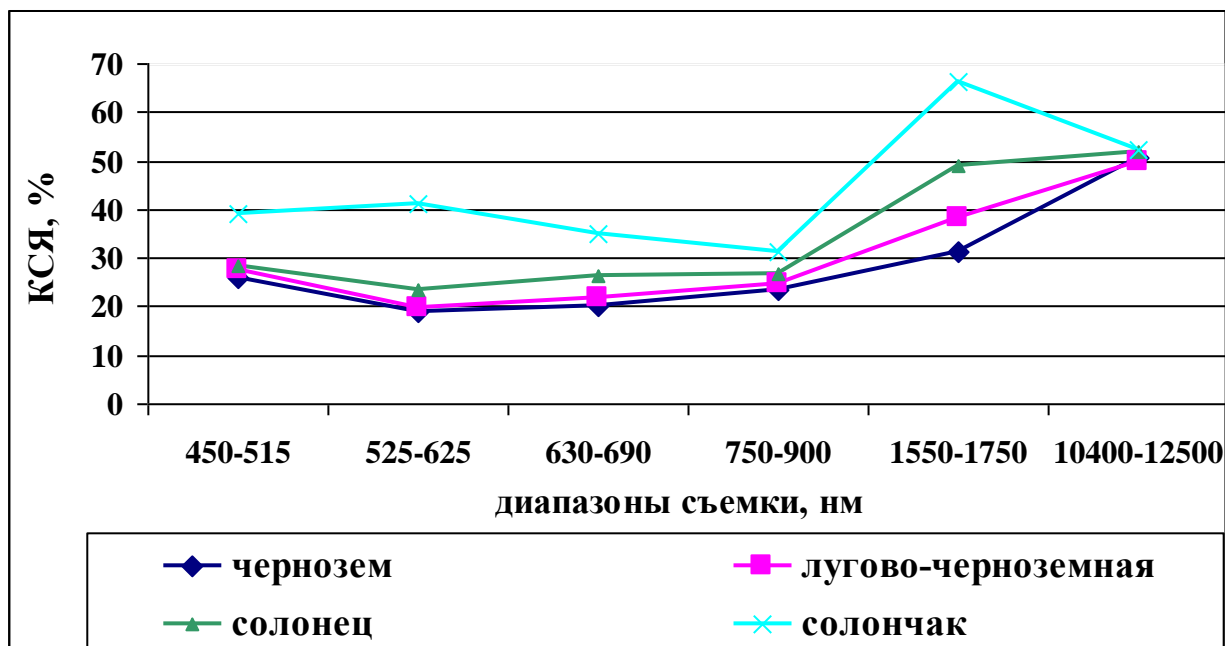


Рис. 6. Изменение коэффициента спектральной отражательной способности основных почв лесостепи Западной Сибири

Согласно [Рисунку 6](#), при прочих равных условиях, в видимой части спектра 400–750 нм и даже в ближнем инфракрасном диапазоне (750–900 нм) как и при выявлении различия полевых культур, невозможно установить принципиальные особенности светоотражения определенных типов почв. В этих диапазонах съемки почти все основные почвы характеризуются одинаковой степенью светоотражения. На черноземе обыкновенном рассматриваемая величина составляла – 26 %, на лугово-черноземной почве – 27 %, солонце мелком – 28 %, и лишь на солончаке – 39 %.

Причем, независимо от того, что в разных зонах спектра лучше или хуже проявляются различия почвенного и растительного покрова, величина КСЯ солончака во всех диапазонах съемки существенно отличается от КСЯ других почв. Это, очевидно, обусловлено тем, что у солончака окраска поверхностного слоя почвы обычно светлее, чем у остальных почв данной территории, как за счет повышения концентрации солей в пахотном слое, так и вследствие низкой всхожести пшеницы на засоленной почве и, соответственно, низкого проективного покрытия агроценоза. Такой вывод в полной мере согласуется с исследованиями по почвенному дешифрированию, ранее проведенными М. Платоненко (1982), Дитц и Смоленцевым (2002) и Л.Ю. Дитц (2003).

И, так же как и в приведенном выше примере, дифференциация спектра отражения биогеоценозов наиболее четко идентифицируется лишь в среднем инфракрасном диапазоне съемки (1550–1750 нм). Здесь проявляются существенные различия между светоотражением пшеницы на разных типах почв: чернозем обыкновенный – 31 %, лугово-черноземная – 38 %, солонец мелкий – 49 %, солончак – 66 %.

Изучение свойств почв северо-восточной части Евразии позволило установить, что максимальная величина поглощения солнечной энергии 69 % характерна для черноземной почвы. Это на 30 % больше чем в тех же условиях у солонца темного. Результаты согласуются с данными, полученными в других регионах Планеты ([Волобуев, 1974](#)).

Таким образом, наиболее информативным с позиции изучения почвенных условий при проведении мониторинга плодородия земель сельскохозяйственного значения является средний инфракрасный диапазон съемки 1550–1750 нм. Именно при учете этого показателя, открывается возможность идентифицировать и специфические условия той или иной почвы, и различия возделываемых культур.

Эти особенности поглощения экосистемами компонентов спектра солнечной радиации проявляются при синтезировании космических снимков, полученных в различных условиях формирования изучаемых экосистем.

Выполнен многомерный регрессионный анализ зависимости величины КСЯ $Z = f(R, B)$, светоотражения пшеницы и овса в системе RGB от его компонентов в красном R и синем B каналах. Это позволило показать принципиальные различия светоотражения двух зерновых культур на черноземной и солонцевой почвах.

Соответственно варианту синтезирования, различаются математические модели, представленные на Рисунках 7а и 7б (Березин, 2013).

Расчёт простой линейной зависимости не позволил выявить существенную зависимость КСЯ ни от типа почвы, ни от возделываемой культуры. Аналогичного положительного результата не было получено как при использовании мультиспектральных космических снимков, так и наземных снимков цифровой камерой с набором светофильтров.

Лишь сложные математические модели (1), (2) и их графическая интерпретация позволяют более глубоко вскрыть природу процесса поглощения-отражения светового спектра различных зерновых культур в фазу их созревания.

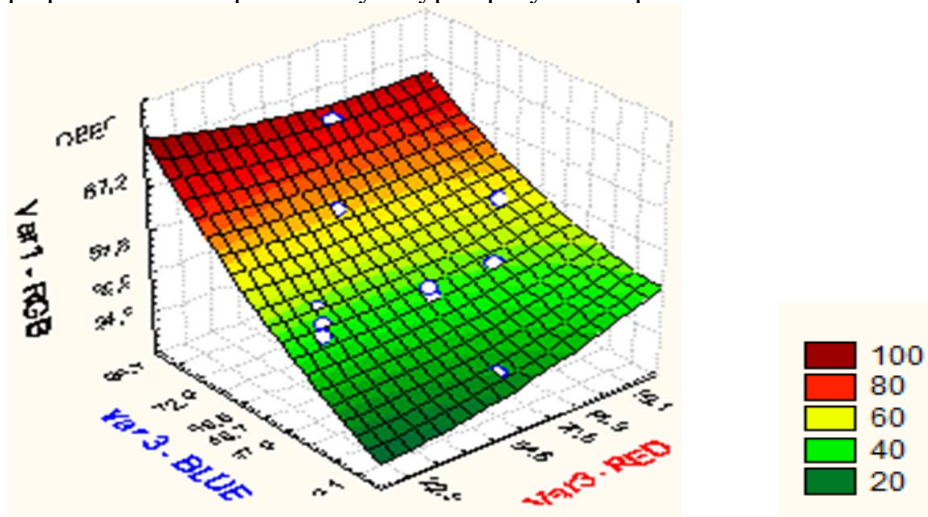


Рис. 7а. Зависимость величины КСЯ в системе RGB биогеоценоза овса на черноземно-солонцевом комплексе почв в лесостепи Западной Сибири

$n=10$; var. 2, R-0,4; G-0,3; B-0,2

$КСЯ(RGB) = Z = f(Red, Blue) = f(x, y)$

$$Z = 11.1088 + 0.0579 \cdot x + 0.6122 \cdot y + 0.0021 \cdot x^2 - 0.0043 \cdot x \cdot y + 0.0034 \cdot y^2, \% \quad (1)$$

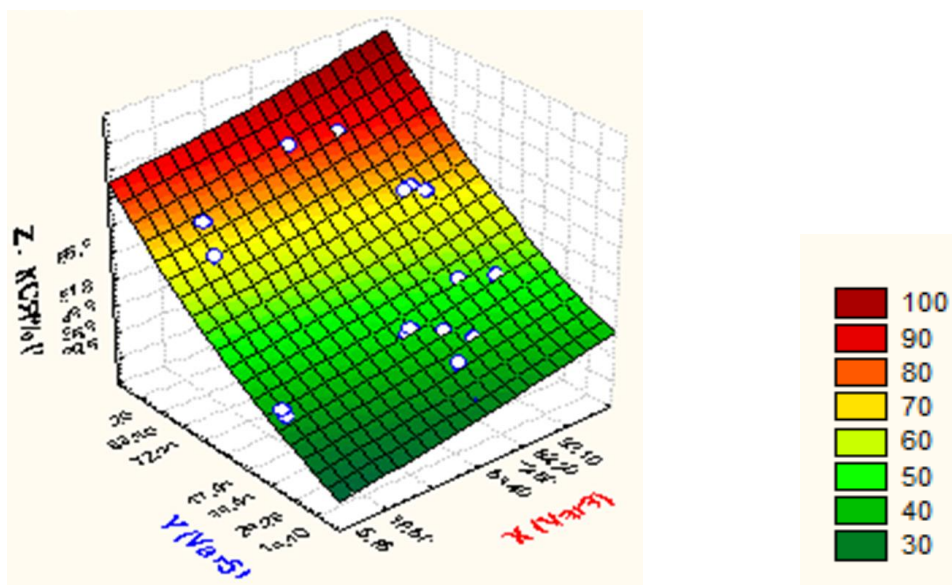


Рис. 7б. Зависимость величины КСЯ в системе RGB биогеоценоза яровой пшеницы на чернозёме выщелоченном в почвенном комплексе Западной Сибири

$$Z = 18.3289 + 0.0911 \cdot x + 0.2864 \cdot y + 0.0004 \cdot x^2 - 0.0001 \cdot x \cdot y + 0.003 \cdot y^2, \% \quad (2)$$

Такой подход нам представляется новым продуктивным вариантом решения задачи выявления факторов, определяющих урожайность возделываемых культур на основе материалов ДЗЗ.

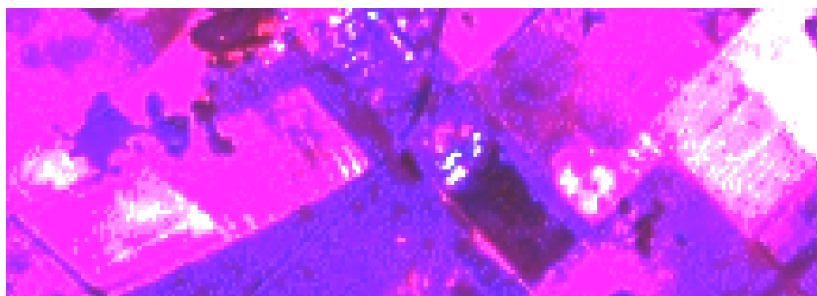
Достаточно обратить внимание на то, что в полученных вариантах синтеза модели коэффициенты регрессии отражения радиации в синем диапазоне (Blue) на снимках посева овса превышают коэффициент регрессии отражения красного канала спектра (Red) практически на порядок. В тех же условиях различие спектрального отражения яровой пшеницей по соотношению указанных коэффициентов изменяется только в 3 раза.

Полученные результаты показали, что применением космической съемки можно выявить земельные массивы, которые в Западной Сибири и на Дальнем Востоке оказались подверженными подтоплению земель, даже на полях полевых севооборотов. В зоне северной лесостепи было установлено, что ранее неиспользуемый при анализе NDVI коротковолновый сине-зеленый диапазон спектра солнечной радиации 350–450 нм на почвах гидроморфного ряда, наряду с красным длинноволновым диапазоном, может иметь весьма существенное значение для построения модели, выявляющей роль поглощаемых компонентов солнечного спектра при формировании продуктивности наземных агроэкосистем.

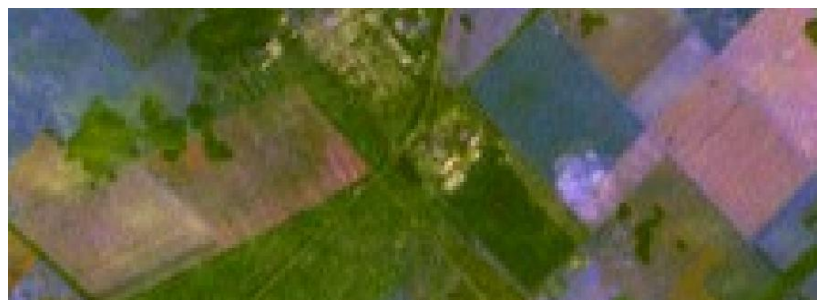
Значение интенсивности инфракрасной части спектра солнечной радиации, по роли которой в жизни биосферы ни К.А. Тимирязев, ни В.Р. Волобуев не имели экспериментальных данных, были нами изучены при прямом определении информативности космических снимков в разных диапазонах съемки на полях одного и того же хозяйства. Результаты приведены на [Рисунке 8](#).

На снимке КА Landsat-7 (2001 г.) анализировали варианты светоотражения в условных номерах каналов 10–70, включая три варианта 10–30 видимой части солнечного спектра RGB: 400–750 нм и три варианта инфракрасного канала (50–70) в диапазоне от 750 до 2300 нм. При демонстрации результатов ДЗЗ на синтезированных снимках индексами RGB обозначены цветовые каналы: красный, зеленый и синий, а номерами – диапазоны съемки.

Благодаря разному сочетанию каналов лишь одного гиперспектрального космического снимка полей ОПХ «Омское», по величине светоотражения экосистем легко выделяются на одном и том же земельном массиве посевы различных культур, либо контуры лесов и элементарные ареалы групп различных почв: черноземы, солонцы, солоды.



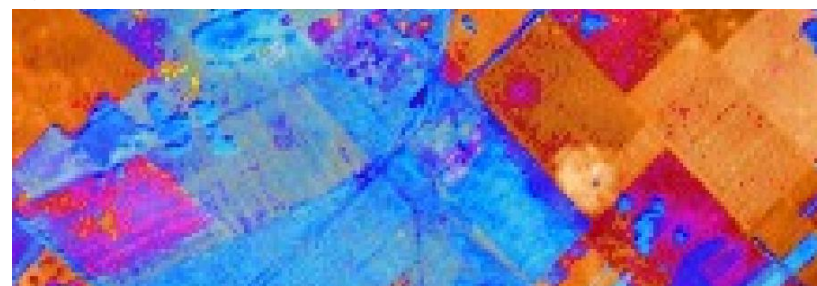
8.1



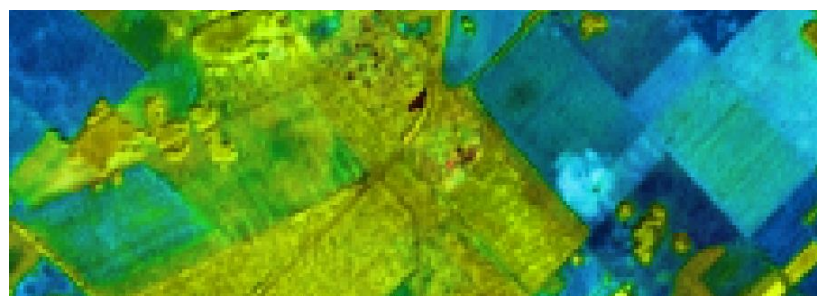
8.2



8.3



8.4



8.5

Рис. 8. Варианты синтезирования КА Landsat-7 посева яровой пшеницы на полях с комплексным почвенным покровом ОПХ «Омское» путём сочетания диапазонов видимого (10–30) и ИК солнечного спектра (50–70)

8.1. R50 G30 B10 В посевах пшеницы среди темных пятен березовых колков на западных полях четко видны светлые пятна солонцов

8.2. R70 G40 B10 Цветопередача леса (зелёный цвет) и посевов (бурый цвет). Солнцовые пятна не видны. Чётко проявились малогумусные пятна солоди (аналог подзолов)

8.3. R20 G10 B70 Распознаётся пятно солонца (тёмное) и пятно солоди. Четко различаются посевы полевых культур

8.4. R30 G10 B70 Изменён канал R20 на R30. Обеспечено чёткое различие по окраске лесных массивов и малопродуктивных почв

8.5. R20 G40 B70 Замена уровня канала G (сравнить с 8.3) обеспечила нивелирование отражения солонцовых почв в посевах пшеницы. Сохраняется изображение пятна солоди в паровом поле. Видна нежно-салатная окраска леса.

Благодаря перерасчету величины светоотражения в показатель поглощения солнечной энергии различных агроэкосистем, появилась возможность прямого определения энергии почвообразования, в отличие от использованных В.Р. Волобуевым 50 лет назад косвенных подходов на основе региональных показателей солнечной радиации.

Приведенные материалы свидетельствуют о том, что, несмотря на различия методических принципов интерпретации космоснимков в США и России, в самом начале XXI века одновременно была обоснована целесообразность использования принципиально новой гиперспектральной технологии ДЗЗ. Под руководством P.S. Thenkabail, R. Nigam четыре исследовательских центра США и Индии в 2016–2018 гг. провели съемку установленным на БПЛА лабораторным спектрорадиометром состояния земельного фонда ряда штатов Индии. Съемка была выполнена в спектральных областях 350–2500 нм с интервалом 10 нм.

В результате было установлено, что гиперспектральные данные обеспечивают лучшую точность классификации исследованных объектов по сравнению с мультиспектральными снимками, и более точное картографирование состояния земель сельскохозяйственного назначения (Thenkabail et al., 2004; Melgani, Bruzzone, 2004; Gitelson et al., 2011; Zarco-Tajada et al., 2013; Clark, 2017; Xu et al., 2018; Nigam et al., 2019).

Исследования российских почвоведов сибирского региона, проведенные в этот же период, но не методами лабораторных исследований по ключевым участкам, а путем усложненного дешифрирования космических снимков, постоянно поступающих с огромных территорий, позволили более глубоко проанализировать характер поглощения солнечной энергии экосистемами, сформировавшимися на различных компонентах почвенных комплексов, а также на почвах разной степени деградации (Шаяхметов и др., 2014). В результате существенно повысилась информативность почвенного картирования при значительном снижении трудозатрат на полевые работы и лабораторные исследования почвенных образцов. Приоритет значимых российских разработок технологии гиперспектральной съемки КА, подтвержденный полученными патентами, как на определение дефицита гумуса, так и на технологию почвенно-агрохимического картирования задолго до зарубежных ученых, свидетельствует об эффективности разработанного сибирскими почвоведомии направления изучения космической информации (Березин и др., 2016; Сергеева и др., 2008).

Следует особо отметить новый вариант использования гиперспектральной съемки в системе защиты растений, разработанный индийскими учеными во втором десятилетии XXI в. Ранее космические снимки давали лишь фотографическое изображение массивов, подверженных нападению лугового мотылька или саранчи. Это позволяло проводить опыление либо опрыскивание посевов пестицидами, но уже пораженных в значительной степени.

Ещё сложнее борьба с болезнями растений и, особенно, с ржавчиной в посевах пшеницы. В последние годы её распространение и вредоносность можно сравнить с недавним появлением заболевания человека COVID2019. Бурая (*Puccinia triticina*) и стеблевая (*Puccinia graminis*) разновидности ржавчины – одни из основных вредоносных болезней пшеницы в большинстве регионов мира, где возделывается эта культура. Ежегодно в мире потери урожая в результате поражения этим патогеном составляют около 30–40 % (Пожерукова и др., 2019). Кроме того, грибные патогены приводят к снижению качества

зерна. Эпифитотии ржавчинных болезней пшеницы в условиях Омской области наблюдаются каждые 3–4 года. Оценка коммерческих сортов пшеницы в Омской области показала, что только у единиц из них наблюдается полевая устойчивость к бурой и стеблевой ржавчине.

Тенденция к потеплению климата, возделывание на основной площади сельскохозяйственных земель восприимчивых к ржавчине и генетически однородных сортов пшеницы приводят к ухудшению фитосанитарной обстановки в регионе. Имеет место мутация патогена по вирулентности, ускорение изменения популяционного состава, появляются новые агрессивные расы патогенна. Это способствует увеличению интенсивности поражения посевов и повышению частоты эпифитотии.

В Зауралье на фоне эпифитотий бурой и стеблевой ржавчины в 2015–2017 гг. из районированных 17 сортов яровой мягкой пшеницы высокую толерантность к ржавчине проявили лишь два сорта: Радуга и Уралосибирская, занимающие в Омской области только 8–9 % площади (Мальцева и др., 2019). Районированные сорта-стандарты Омская 36, Терция, Омская 35 оказались неустойчивыми к бурой и стеблевой ржавчине и показали наивысший балл поражения.

Существует угроза опасных рас стеблевой ржавчины с африканского континента Ug 99 и из Сицилии. Они уже распространились в большинстве стран Европы.

Наиболее экономически обоснованным фактором сохранения стабильности сборов зерна является создание и внедрение в производство сортов, сочетающих высокую продуктивность и засухоустойчивость с устойчивостью к болезням.

Исследования индийских коллег показали, что есть надежда на выявление устойчивых гибридов пшеницы по материалам дистанционного зондирования серийных снимков КА широкого диапазона съемки отражения солнечной радиации высокого разрешения еще на стадии селекционного процесса. В производстве использование таких материалов позволяет своевременно выявить самые первые очаги проявления эпифитотии и принять упреждающие меры к их подавлению.

Ранее выполненные экспериментальные работы, посвященные изучению спектра отражения солнечной радиации, не выявили различий заболевших и здоровых растений. Но благодаря детальности съемки и полноте охвата солнечного спектра в диапазоне от 350 до 2500 нм при гиперспектральном анализе изучаемых объектов, стало возможным проводить надёжную диагностику заболевания растений.

Примером реализации рассмотренного подхода является информация в разделе «Новости» российской компании «Совзонд» за 17.03–07.04.2020 г. (Рисунок 9).

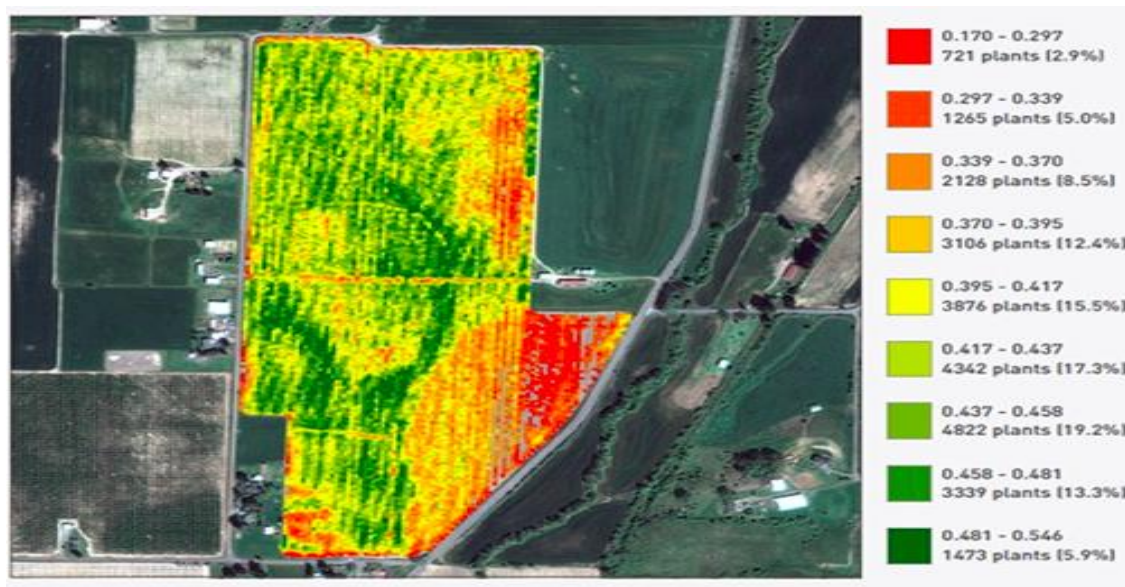


Рис. 9. Карта спектра отражения растительности от 200 до 550 нм, полученная системой Airbus [Электронный ресурс]. URL: www.intelligence-airbusds.com

На [Рисунке 9](#) представлен первый поисковый вариант карты светоотражения древесных насаждений, основанный на спутниковых снимках и агрономической аналитике премиум-класса.

Продукт AgNeo, как сообщает вышеуказанный сайт, в состоянии использовать данные с разрешением в 30 см с новых спутников Airbus Pléiades Neo, которые планируется запустить в конце 2020 года.

Первым вариантом такого рода материалов служит карта растительного покрова Европы (URL: <http://s2glc.cbk.waw.pl/>), созданная миссией из двух спутников Copernicus Sentinel-2 (2017) с разрешением 10 м. Оба спутника идентичны. Каждый оснащен мультиспектральной камерой, способной обеспечить получение снимков, отображающих различные типы покрытия земной поверхности, такие как лес, посевные площади, луга, вода, а также элементы антропогенного ландшафта (дороги, здания и т.д.).

Снимки могут быть использованы для определения количества хлорофилла и воды в листьях, что позволяет отслеживать изменения в состоянии и росте растений. Судя по материалам индийских ученых, есть уверенность, что будет возможно уже не по видимой части солнечного спектра, а по анализу среднего ИК-диапазона спектра излучения своевременно обнаружить существенные изменения в падении интенсивности поглощения растениями солнечной энергии вследствие нарушения деятельности хлорофилловых компонентов листа.

Совместные исследования ученых Индии и США ([Nigam et al., 2019](#)) с использованием гиперспектрального анализа показали ([Рисунок 10](#)), что вредоносность *Ruscinia* имеет весьма узкий спектр распознавания – лишь в диапазонах видимой части солнечного спектра 662–702 нм и среднем ИК диапазоне SWIR 2155–2175 нм.

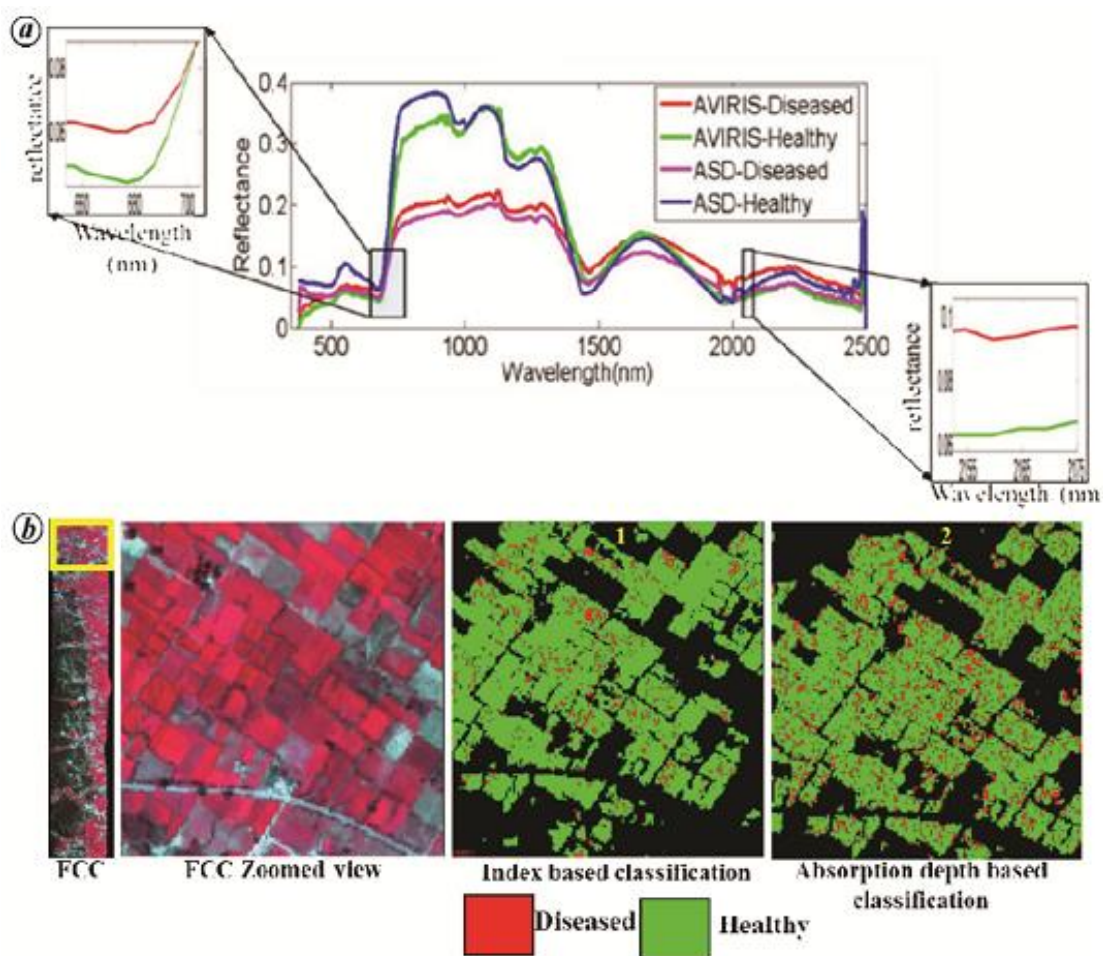


Рис. 10. а) Распознавание кривой светоотражения для идентификации болезни пшеницы; б) отражение света массивами здоровой и больной пшеницы с использованием различных методов анализа светоотражения экосистем ([Nigam et al., 2019](#)).

В видимой коротковолновой части спектра от 400 до 500 нм, при использовании двух вариантов анализа, различия в спектре объектов практически отсутствуют. Но уже в длинноволновой красной части спектра (600 нм) больные растения (выделяемые красным цветом) отражают заметно большую часть поступающей солнечной энергии. Аналогичная картина проявилась и в диапазоне 1100–1200 нм. Очевидно, здоровые растения поглощают энергию Солнца полнее, чем больные. В крайнем красном канале около 700 нм отражение радиации резко сокращается с 0,10 до 0,05 условных единиц, но уже в области инфракрасного канала около 1100 нм светоотражение увеличивается в 8–10 раз. При этом светоотражение здоровых растений оказывается значительно более интенсивным, чем слабых больных растений. Это свидетельствует, что в данном диапазоне радиации хлорофилл пораженных растений прекращает свою деятельность, и растения резко сокращают интенсивность накопления органического вещества.

Как реагируют другие культуры на компоненты поступающего на Землю солнечного спектра, покажут дальнейшие исследования в разных природных зонах и в разных условиях водообеспечения посевов разных биологических групп растительности. И в этом реальную пользу окажет гиперспектральный анализ поглощаемого наземными экосистемами спектра солнечной радиации.

При условии получения положительных результатов тестирования в разных регионах Планеты, методически согласованные эксперименты позволят сделать гиперспектральный анализ растений эффективным как с экологической, так и с экономической точки зрения.

К сожалению, после неудачных попыток получения индивидуальных спектров отражения основных полевых культур по снимкам Landsat-7, почти все используемые до последнего времени КА высокого разрешения проводят съемку лишь в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Только КА Sentinel-2 позволяет одновременно получать снимки среднего и высокого разрешения в видимом и в среднем инфракрасном диапазоне (Clark, 2017). Благодаря этому создана реальная возможность проводить гиперспектральную съемку биогеоценозов и различных агроэкосистем.

Развитие методики ДЗЗ на основе гиперспектральной съемки позволит значительно углубить наши знания о путях использования солнечной энергии в целях совершенствования элементов системы земледелия, включая систему защиты растений от биологических стрессов.

Возможно, будут найдены новые пути повышения плодородия бедных почв за счет обеспечения более эффективного поглощения ими солнечной энергии и, тем самым, будут вскрыты новые закономерности формирования почвенного плодородия. В результате будет создана возможность углубить теорию энергетике почвообразования в целях понимания процесса гумусообразования. Откроется возможность активизации не используемого в настоящее время гумина для повышения продуктивности почв низкого плодородия.

4. Заключение

В настоящей работе представлены материалы по впервые обоснованному анализу широкого спектра солнечной радиации по аэро- и космическим снимкам наземных экосистем, разработанному одновременно в США и России. Ученые США, а вслед за ними Индии и Германии для изучения отражательной способности почв и различных культурных растений, начиная с 1968 г. используют лабораторные спектрометры. Лишь во втором десятилетии XXI в., установив спектрорадиометры на БПЛА, а затем на самолеты, в Индии в 2016-2019 гг. получены аэрофотоснимки посевов пшеницы, сахарного тростника, винограда и сахарной свеклы. При этом по анализу растений была выявлена не только биологическая продуктивность посевов, но и содержание в растениях хлорофилла и других компонентов растения. Благодаря картографической съемке в ряде штатов юга Евразии с полным анализом солнечного спектра доказано, что гиперспектральная съемка обеспечивает большую информативность, чем повсеместно используемая мультиспектральная съемка, и повышенную точность картографирования земельных фондов при снижении затрат на проведение полевых работ.

Наибольшую новизну данных исследований представляют материалы по определению спектра отражения посевов пшеницы пораженных ржавчиной (*Puccinia*), одним из наиболее опасных ее заболеваний, которые ранее распознавали только наземным способом визуально

уже после массового проявления поражения посевов. Это существенно ограничивало эффективность применяемых мероприятий по защите растений.

Работами российских ученых Омского аграрного университета, проведенных с 2004 г. на основе принципиально иной методики усложненного анализа снимков космической системы *Landsat*, впервые в условиях северо-востока Евразии установлена реальная возможность применения гиперспектрального анализа материалов ДЗЗ. Доказано, что наиболее информативным при анализе типа полевых культур и почв, на которых они возделывались, является не видимый спектр солнечной радиации, а средний инфракрасный диапазон 1500–1750 нм. Приоритет значимых российских разработок технологии по использованию космической информации в широком диапазоне до 1750 нм подтвержден патентами на определение дефицита гумуса и технологию почвенно-агрохимического обследования земель сельскохозяйственного назначения.

На примере анализа данных одного из полученных серийных космических снимков *Landsat-7* было показано, что в зависимости от сочетания видимого и инфракрасного диапазонов можно определить площади различных по плодородию почв, культур в полевых севооборотах, долю и состав лесных насаждений. С использованием многомерного регрессионного анализа удалось установить математически доказанные различия в поглощении наземными экосистемами энергии солнечной радиации.

Наиболее перспективными снимками для исследования широкого спектра поглощения солнечной радиации наземными экосистемами по состоянию на 2020 г являются космические снимки новейших КА типа *Sentinel-2*. Этим показан путь целевого использования солнечной энергии для лучшего понимания энергетики процесса почвообразования и повышения плодородия почвы. Кроме того, с учётом материалов индийских коллег, открыта возможность разработки новых методов защиты растений.

Литература

Айрапетян и др., 2011 – Айрапетян В.С., Широкова Т.А., Антипов А.В. (2011). Расчет спектров поглощения некоторыми органическими веществами в инфракрасном диапазоне // *Геодезия и аэрофотосъемка*. 2011. 6: 76-79.

Андроников, 1976 – Андроников Л.В. Дешифрирование почв и сельскохозяйственных культур по спектральным и многозональным аэроснимкам / Исследование природной среды космическими средствами. М., 1976. 147-155.

Баррет, Куртис, 1979 – Баррет Э., Куртис Л. Введение в космическое земледевие. М.: Прогресс, 1979. 368 с.

Березин, 2006 – Березин Л.В. Мелиорация и использование солонцов Сибири: монография. Омск: Изд-во ФГОУ ВПО ОмГАУ, 2006. 208 с.

Березин, 2010 – Березин Л.В. Научные основы корректировки почвенных карт на базе космических снимков // Методическое обеспечение мониторинга земель сельхоз. назначения: Материалы Всероссийск. науч. конф. Почв. ин-т им. Докучаева. М., 2010. 235-240.

Березин, 2011 – Березин Л.В. Использование программного комплекса ENVI для почвенного дешифрирования космических снимков // *Geomatics*. 2011. 2: 90-91.

Березин, 2012 – Березин Л.В. Авангард сибирского земледелия. К истории земледелия Сибири. Омск: Изд-во ИП Макшеевой, 2012. 132 с.

Березин, 2013 – Березин Л.В. Способность к поглощению солнечной радиации почвами и биоценозами / Актуальные проблемы биологии, нанотехнологий и медицины. Мат-лы V Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2013. 371-372.

Березин, 2015 – Березин Л.В. Отражение спектра солнечной радиации в экосистемах по материалам дистанционного зондирования Земли. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 4 (20): 24-32.

Березин и др., 2005 – Березин Л.В., Зарайский Б.В., Никитин С.С., Сергеева О.С., Лысенко И.В. Изучение комплексного почвенного покрова лесостепи Западной Сибири с использованием многозональных космических снимков // Кадастр объектов недвижимости. Современные технологии сбора, обработки и представления геоинформации. Омск, 2005. С. 77-79.

Березин и др., 2016 – Березин Л.В., Красницкий В.М., Шмидт А.Г., Шаяхметов М.Р. Патент RU № 2 572 712 С2 МПК G01N 33/24. Способ агрохимического обследования почв. Приоритет от 28.03.2014. Опубликовано 20.04.2016. Бюл. № 1. Патентообладатель ФГБОУ ВПО Омский агроуниверситет и ФГБУ Центр агрохимической службы «Омский».

Березин и др., 2008 – Березин Л.В., Семенов (Гиндемит) А.М., Троценко И.А. (2008). Актуальные проблемы использования мелиорируемых земель в Западной Сибири // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2008. 1: 14-17.

Березин, Сергеева, 2007 – Березин Л.В., Сергеева О.С. Научные основы мониторинга и процессов деградации почв с использованием космической информации / *Опустынивание земель и борьба с ним*. Материалы Международной научной конференции по борьбе с опустыниванием (Республика Хакасия, Абакан, 16-19.05.06), Абакан, 2007. 298-301.

Березин, Чемерилова, 2008a – Березин Л.В., Чемерилова В.А. РИП – интеллектуальный продукт (РИП), зарегистрированный ФГУП «ВНТИЦ» 29.07.08 № 73200800079. Методика объективной оценки определения глянца (GLOW) почвенных структурных агрегатов и отблеска биогеоценозов при дешифрировании спектрально-зональных космических и наземных снимков.

Березин, Чемерилова, 2008b – Березин Л.В., Чемерилова В.А. Отблеск (Glow) как показатель отражательной способности почв / *Материалы V съезда Всерос. общества почвоведов им. В.В. Докучаева*. Ростов-на-Дону, 2008. 232.

Березин, Шаяхметов, 2012 – Березин Л.В., Шаяхметов М.Р. Методологические основы изучения природно-ресурсного потенциала региона // *Омский науч. Вестник*. 2012. 1: 146-149.

Березин, Шаяхметов, 2018 – Березин Л.В., Шаяхметов М.Р. (2018). Космическая информация – новый путь оценки плодородия почв и разработки рекомендаций по мелиорации и применению удобрений / *Плодородие почв и оценка продуктивности земледелия. VIII Сибирские Прянишниковские агрохимические чтения: материалы международной науч.-практ. конф.* Тюмень, 18–20 июля 2018 г.

Болсуновский, 2009 – Болсуновский М.А. Перспективные направления развития дистанционного зондирования Земли из космоса // *Geomatics*. 2009. 2: 12-15.

Варрон, 1963 – Варрон М.Т. Сельское хозяйство. М.-Л.: АН СССР, 1963. 216 с.

Виноградов, 1990 – Виноградов Б.В. Аэрокосмические методы в почвоведении и их использование в сельском хозяйстве. М.: Наука, 1990. 247 с.

Волобуев, 1974 – Волобуев В.Р. Введение в энергетику почвообразования. М., 1974. 128 с.

Воропаева, 1982 – Воропаева З.И. Особенности солевого режима и динамики обменных оснований мелиорированных солонцов Западной Сибири. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1990. 21 с.

Гиндемит, 2007 – Гиндемит А.М. Влияние приемов мелиорации на свойства и продуктивность солонцовых комплексов лесостепной зоны Омского Прииртышья: автореф. дис...канд. биол. наук. Тюмень, 2011. 20 с.

Гопп и др., 2008 – Гопп Н.В., Смирнов В.В., Куликова Е.А. Исследование закономерностей латеральной дифференциации почвенного покрова в зависимости от факторов почвообразования с использованием многозональных и радиолокационных снимков / *Материалы международного научного конгресса «Гео-Сибирь – 2008»*. Новосибирск, 2008. 239-243.

Горшенин, 1928 – Горшенин К.П. Лекции по почвоведению. Изд. Сиб. ин-т сель. хоз-ва и лесоводства. Омск, 1928. 158 с.

Горшенин, 1955 – Горшенин К.П. Почвы южной части Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 592 с.

Дитц, 2003 – Дитц Л.Ю. Методологические аспекты ландшафтно-индикационного изучения почвенного покрова (на примере Барабинской лесостепи). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 127 с.

Дитц, Смоленцев, 2002 – Дитц Л.Ю., Смоленцев Б.А. Геоинформационные системы в почвенной картографии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2002. 78 с.

Докучаев, 1883 – Докучаев В.В. По вопросу о сибирском черноземе. Сочинения. Т. 2. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 357-381.

Еремченко, 1997 – Еремченко О.З. Природно-антропогенные изменения солонцовых почв в Южном Зауралье. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1997. 317 с.

- Классификация...**, 2004 – Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 324 с.
- Клейн, Березин, 2017** – Клейн Н.А., Березин Л.В. Анализ подтопления земель по космическим снимкам – путь раскрытия факторов техногенной и природной безопасности / Сборник научных работ по материалам IV Всероссийской научной конференции «Техногенная и природная безопасность». Саратов, 2017. 231-237.
- Климат Омска, 1980** – Климат Омска. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 248 с.
- Книжников и др., 2011** – Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник. М.: Изд. Центр «Академия», 2011. 412 с.
- Кравцова, 2005** – Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.
- Ломоносов, 1957** – Ломоносов М. В. Полн. собр. соч. М., Л. 1957. 10: 322-323.
- Ломоносов, 1763** – Ломоносов М.В. О слоях земных. Первые основания металлургии или рудных дел. СПб: тип. ИАН, 1763 (1957). Прибавление 2. Соч. М.-Л. 10: 237
- Мальцева и др., 2019** – Мальцева Л.Т., Филиппова Е.А., Банникова Н.Ю., Ионина Н.В. Селекционная ценность устойчивого к болезням исходного материала пшеницы в условиях Зауралья // Вестник Омского ГАУ. 2019. 1(33): 21-30.
- Неуструев, 1931** – Неуструев С.С. Элементы географии почв. М.-Л., 1931. 216 с.
- Орлов, 1982** – Орлов Д.С. Новые проблемы спектральной отражательной способности почв и ландшафтов // Почвоведение. 1982. 1: 117-119.
- Орлов и др., 2001** – Орлов Д.С., Суханова Н.И., Розанова М.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 176 с.
- Платоненко, 1982** – Платоненко М.А. (1982). Об информационных возможностях космических снимков // Создание, математическая обработка геодезических сетей сгущения и сельскохозяйственное картографирование / Ом. с.-х. ин-т. Омск, 1982. 39-42.
- Пожерукова и др. 2019** – Пожерукова В.Е., Шаманин В.П., Гладких М.С., Чурсин А.С., Гультаева Е.И. Оценка коллекции сортов сети КАСИБ в условиях южной лесостепи Западной Сибири // Вестник Омского ГАУ. 2019. 1(33): 30-36.
- Разумов, 2004** – Разумов В.И. Категориально-системная методология в подготовке ученых. Омск: Изд-во Омск. гос. ун-та, 2004. 227 с.
- Савич, 2006** – Савич В.И. Агрономическая оценка отражательной способности системы почва-растение методом компьютерной диагностики. М.: МСХА, 2006. 75 с.
- Семендяева и др., 2017** – Семендяева Н.В., Елизаров Н.В., Галеева Л.П., Коробова Л.Н. Длительность действия химической мелиорации на свойства солонцов Барабинской равнины. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017. 190 с.
- Семененко (Гиндемит), 2007a** – Семененко (Гиндемит) А.М. Эффективность длительного действия гипсования солонцов с различным содержанием обменного натрия / *Материалы международной научно-практ. конф. молодых ученых СО РАСХН «Молодые ученые – аграрной науке» (4–5 июля 2007 г.)*. Омск: Сфера, 2007. 169-176.
- Семененко (Гиндемит), 2007b** – Семененко (Гиндемит) А.М. Категориально-системный подход к познанию процесса мелиорации солонцов / *Труды II Национальной конференции с международным участием «Проблемы истории, методологии и философии почвоведения» (5–9 ноября 2007 г.)*. Пущино: Изд-во Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, 2007. Т. 2: 332-335.
- Сергеева, 2007a** – Сергеева О.С. Возможность использования космических снимков при корректировке почвенных карт в целях рационального использования адаптивно-мелиоративных систем земледелия / *Молодые ученые – аграрной науке*. Материалы Междунар. науч. конф. Омск, 2007. 177-183.
- Сергеева, 2007b** – Сергеева О.С. Методологические аспекты спектральной отражательной способности агрофитоценозов / *Организация почвенных систем*. Тр. II нац. конф. с междунар. участием. Пущино, 2007. 377-380.
- Сергеева, 2009** – Сергеева О.С. Использование спектральной отражательной способности агрофитоценозов при дешифрировании космических снимков в целях рационального использования земель // *Проблемы рационального использования малоплодородных земель*. Мат. Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2009. 106-116.

Сергеева, 2011 – Сергеева О.С. Использование спектральной отражательной способности почв и агрофитоценозов для мониторинга плодородия почв. Автореф. диссер. на соискание уч. степени канд. биол. наук. Тюмень, 2011. 16 с.

Сергеева, Лысенко, 2004 – Сергеева О.С., Лысенко И.В. О возможности почвенного дешифрирования космических снимков равнинной территории Западной Сибири / *Природные и интеллектуальные ресурсы Омского региона: Мат. 1-й межвуз. науч. студенч. конф.* Омск, 2004. 55-59.

Сергеева, Березин, 2006 – Сергеева О.С., Березин Л.В. Научные основы мониторинга и процессов деградации почв с использованием космической информации / *Материалы Междунар. конф. по борьбе с опустыниванием 16–19 мая 2006.* Абакан, 2006. 298-303.

Сергеева и др., 2008 – Сергеева О.С., Климович Д.А., Березин Л.В. Патент RU № 2337518. Способ внесения органических удобрений. МПК АО1 С 21/00. Заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО ОмГАУ. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10.10.2008. Заявка № 2006143977 от 11.12.06. Опубликовано 10.11.2008. Бюл. № 31.

Сергеева и др., 2010 – Сергеева О.С., Красницкий В.М., Березин Л.В. Мониторинг почвенного покрова Западной Сибири по данным дистанционного зондирования // *Плодородие.* 2010. 1(52): 7-8.

Сергеева, Гиндемит, 2010 – Сергеева О.С., Гиндемит А.М. Влияние вариантов синтезирования космических снимков спутника Landsat-7 на изучение структуры почвенного покрова солонцовых комплексов // *Вестн. Алт. гос. ун-та.* 2010. 1(63): 40-45.

Тимирязев, 1890 – Тимирязев К.А. Земледелие и физиология растений. М., 1937. Т. 3. 452 с.

Тимирязев, 1948 – Тимирязев К.А. Солнце, жизнь и хлорофилл. Предисловие. Избран. соч. М., 1948. Т. 1. 82-108.

Толчельников, 1974 – Толчельников Ю.С. Оптические свойства ландшафта. Л.: Наука, 1974. 251 с.

Шаяхметов, Березин, 2012 – Шаяхметов М.Р., Березин Л.В. Методологические основы изучения природно-ресурсного потенциала региона // *Омский научный вестник.* 2012. 1(108). 146-149.

Шаяхметов и др., 2014 – Шаяхметов М.Р., Березин Л.В., Балукоев М.С., Сергеева А.Ю. Изучение поглощения солнечной радиации почвами и агроценозами на основе анализа космической информации // *Почвоведение и агрохимия.* 2014. 4: 92-102.

Юшкевич, Березин, 2001 – Юшкевич Л.В., Березин Л.В. Агроклиматические условия возделывания зерновых культур / *Природа, природопользование и природообустройство Омского Прииртышья. Материалы III научно-практической конференции.* Омск, 2001. 269-273.

Aguilar, 2012 – Aguilar F.J. GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments // *Int. J. Remote Sensing.* 2012. 34: 2583-2606.

Aguilar et al., 2012 – Aguilar M.A., Saldaña M.M. and Aguilar F.J. GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments // *Int. J. Remote Sensing.* 2012. 34: 2583-2606.

Asner, Martin, 2008 – Asner G.P., Martin R.E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels // *Remote Sensing Environ.* 2008. 112: 3958-3970.

Ashton, Van Der Meer, 2004 – Ashton M. S., Van Der Meer V. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. // *Remote Sensing Environ.* 2004. 91: 354-376.

Barker et al., 2004 – Barker D.M., Huang W., Guo Y.R., Bourgeois A.J., Xiao Q. N. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results // *Mon. Weather Rev.* 2004. 132: 897-914.

Berezin, 2014 – Berezin L.V. Scientific basis of the adaptive landscape reclamation farming systems // *Biogeosystem Technique* 2014. 1(1): 30-40. DOI: 10.13187/bgt.2014.1.30

Bower, Hanks, 1965 – Bower S.A., Hanks R.J. Reflection of radiant energy from soil // *Soils Sci.* 1965. 100(2): 130-138.

Birth, McVey, 1968 – Birth G.S., McVey G.R. Measuring color of growing turf with a reflectance spectrometer // *Agron. J.* 1968. 60: 640-649.

Chen et al., 2005 – Chen D., Huang J., Jackson T.T. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands // *Remote Sensing Environ.* 2005. 96: 225-236.

Chen et al., 2014 – Chen Y., Lin Z., Zhao X., Wang G., Gu Y. Deep learningbased classification of hyperspectral data // *IEEE J. Appl. Earth Obs. and Remote Sensing.* 2014. 6: 2094-2107.

Clark, 2003 – Clark R.N. Imaging spectroscopy: earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems // *J. Geophys. Res.* 2003. 108: 5131.

Clark, 2017 – Clark M.L. Comparison of simulated hyperspectral HypsIRI and multispectral Landsat 8 and Sentinel-2 imagery for multi-seasonal, regional land-cover mapping // *Remote Sensing Environ.* 2017. 200: 311-325.

Curran et al., 1993 – Curran P.J., Windham W.R., Gholz H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. *Tree Physiol.* 1993. 15: 203-206.

Friedl, Brodley, 1997 – Friedl M.A., Brodley C.E. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data // *Remote Sensing Environ.* 1997. 61: 399-409.

Gamon et al., 1992 – Gamon J.A., Penuelas J., Field C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // *Remote Sensing Environ.* 1992. 41: 35-44.

Gitelson, 2011 – Gitelson A.A. In *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation* (eds Thenkabail, P. S., Lyon, G. J. and Huete, A.) // CRC Press-Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2011. pp. 141-166.

Gitelson et al., 2002a – Gitelson A.A., Kaufman Y.J., Stark R., Rundquist D. (2002). Novel algorithm for remote estimation of vegetation fraction // *Remote Sensing Environ.* 80: 76-87.

Gitelson et al., 2002b – Gitelson A.A., Zur Y., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy // *Photochem. and Photobiol.* 2002. 7: 272-281.

Green, 1998 – Green R.O. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // *Remote Sensing Environ.* 1998. 65: 227-248.

Green et al., 1988 – Green A.A., Berman M., Switzer P., Craig M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 1988. 26: 65-74.

Helmholz, 1854 – Helmholz H. Die Wechselwirkung der Naturkräfte. 1854.

Huete, 1997 – Huete A.R., Liu H., Batchily K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS // *Remote Sensing Environ.* 1997. 59: 440-451.

Hardisky et al., 1983 – Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies // *Photogramm. Eng. Remote Sensing.* 1983. 49: 77-83.

Jacquemoud, 2009 – Jacquemoud S. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing Environ.* 2009. 113: S56-S66.

Jacquemoud et al., 1995 – Jacquemoud S., Baret F., Andrieu B., Danson F.M., Jaggard K. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors // *Remote Sensing Environ.* 1995. 52: 63-172.

Kanning et al., 2018 – Kanning M., Kühling I., Trautz D., Jarmer T. High-Resolution UAV-Based Hyperspectral Imagery for LAI and Chlorophyll Estimations from Wheat for Yield Prediction // *Remote Sens.* 2018. 10: 2000.

Kussul et al., 2017 – Kussul N., Lavreniuk M., Skakun S., Shelestov A. Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data // *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 2017. 14(5): 778-782.

Meerdink, 2016 – Meerdink S.K. Linking seasonal foliar traits to VSWIRTIR spectroscopy across California ecosystems // *Remote Sensing Environ.* 2016. 86: 322-338.

Melgani, Bruzzone, 2004 – Melgani F., Bruzzone L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machine. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 2004. 8: 1778-1790.

Meyer, 1854 – Meyer G.F. Geschichte der Botanik, Königsberg. Bd. 11. 1854.

[Nigam et al., 2019](#) – Nigam R., Tripathy R., Dutta S., Bhagia N., Nagori R., Chandrasekar K., Kot R., Bhattacharya B.K., Ustin S. Crop type discrimination and health assessment using hyperspectral imaging // *Current Science*. 2019. 116(7,10): 1108-1123.

[Ozdogan, Woodcock, 2006](#) – Ozdogan M., Woodcock C.E. (2006). Resolution dependent error in remote sensing of cultivated areas. *Remote Sensing Environ.* 103: 203-217

[Paola, Schowengerdt, 1995](#) – Paola J.D., Schowengerdt R.A. A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely sensed multi-spectral imagery // *Int. J. Remote Sensing*. 1995. 16: 3033-3058.

[Peñuelas et al., 1994](#) – Peñuelas J., Gamon J.A., Fredeen A.L., Merino J., Field C.B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves // *Remote Sensing Environ.* 1994. 48: 135-146.

[Rouse et al., 1974](#) – Rouse, J.W., Has R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III // Final report. Greenbelt. MD. 1974. 371 p.

[Senebier, 1782](#) – Senebier, J. Physicochemical memoirs on the influence of sunlight on the modification of the beings of the three kingdoms of nature, and above all those of the vegetable kingdom. Geneva: Chez Barthelemi Chirol, 1782. In 3 volumes.

[Sims, Gamon, 2002](#) – Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing Environ.* 2002. 81: 337-354.

[Singh, Harrison, 1985](#) – Singh A., Harrison A. Standardized principal components // *Int. J. Remote Sensing*. 1985. 6: 883-896.

[Thenkabail et al., 2004](#) – Thenkabail P.S., Enclona E.A., Ashton M.S., Van Der Meer V. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications // *Remote Sensing Environ.* 2004. 91: 354-376.

[Timiryazev, 1903](#) – Timiryazev K.A. The Cosmical Function of the Green Plant // *Proceedings of the Royal Society*. 1903. Vol. 72.

[Turner et al., 2004](#) – Turner D.P., Ollinger S., Smith M.-L., Krankina O., Gregory M. Scaling net primary production to a MODIS footprint in support of Earth observing system product validation // *Int. J. Remote Sensing*. 2004. 25: 1961-1979.

[Xu et al., 2018](#) – Xu X., Li J., Wu C. Plaza A. Regional clustering-based spatial preprocessing for hyperspectral unmixing // *Remote Sensing Environ.* 2018: 204: 333-346.

[Yonezawa, 2007](#) – Yonezawa C. Maximum likelihood classification combined with spectral angle mapper algorithm for high resolution satellite imagery // *Int. J. Remote Sensing*. 2007. 28: 3729-3737.

[Zarco-Tajada et al., 2013](#) – Zarco-Tajada P.J., Guillin-Climenta M.L., Hernandez-Clemente R., Catalina A. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imaging acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) // *Agric. For. Met.* 2013. 17: 281-294.

References

[Aguilar et al., 2012](#) – Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J. (2012). GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments. *Int. J. Remote Sensing*. 34: 2583-2606.

[Aguilar, 2012](#) – Aguilar, F.J. (2012). GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments. *Int. J. Remote Sensing*. 34: 2583-2606.

[Andronikov, 1976](#) – Andronikov, L.V. (1976). Deshifirovaniye pochv i sel'skokhozyaystvennykh kul'tur po spektral'nym i mnogozonal'nym aerosnimkam [Deciphering of soils and crops using spectral and multi-zone aerial photographs]. Issledovaniye prirodnoy sredy kosmicheskimi sredstvami. M. 147-155. [in Russian].

[Ashton, Van Der Meer, 2004](#) – Ashton, M.S., Van Der Meer, V. (2004). Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing Environ.* 91: 354-376.

[Asner, Martin, 2008](#) – Asner, G.P., Martin, R.E. (2008). Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing Environ.* 112: 3958-3970.

[Ayrapetyan et al., 2011](#) – *Ayrapetyan, V.S., Shirokova, T.A., Antipov, A.V.* (2011). Raschet spektrov pogloshcheniya nekotorymi organicheskimi veshchestvami v infrakrasnom diapazone [Calculation of the absorption spectra of some organic substances in the infrared range]. *Geodeziya i aerofotos'yemka*. 6: 76-79. [in Russian].

[Barker, 2004](#) – *Barker, D.M., Huang, W., Guo, Y.R., Bourgeois, A.J., Xiao, Q.N.* (2004). A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results. *Mon. Weather Rev.* 132: 897-914.

[Barret, Kurtis, 1979](#) – *Barret, E., Kurtis, L.* (1979). Vvedeniye v kosmicheskoye zemlevedeniye [Introduction to space geography]. M.: Progress. 368 p. [in Russian]

[Berezin i dr., 2005](#) – *Berezin, L.V., Zarayskiy, B.V., Nikitin, S.S., Sergeeva, O.S., Lysenko, I.V.* (2005). Izucheniye kompleksnogo pochvennogo pokrova lesostepi Zapadnoy Sibiri s ispol'zovaniyem mnogoazonal'nykh kosmicheskikh snimkov [The study of the integrated soil cover of the forest-steppe of Western Siberia using multizone satellite imagery]. *Kadastr ob'yektov nedvizhimosti. Sovremennyye tekhnologii sbora, obrabotki i predstavleniya geoinformatsii*. Omsk. 77-79. [in Russian]

[Berezin i dr., 2008](#) – *Berezin, L.V., Semenenko (Gindemit), A.M., Trotsenko, I.A.* (2008). Aktual'nye problemy ispol'zovaniya melioriruemykh zemel' v Zapadnoi Sibiri [Actual problems of the use of reclaimed land in Western Siberia]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaistvo*. 1: 14-17. [in Russian]

[Berezin i dr., 2016](#) – *Berezin, L.V., Krasnitskiy, V.M. Shmidt, A.G., Shayakhmetov, M.R.* Patent RU № 2572712 C2. MPC G01N 33/24, 2015. Sposob agrokhimicheskogo obsledovaniya pochv [Patent RU № 2572712 C2 IPC G01N 33/24. The method of agrochemical examination of soils]. Prioritet ot 28.03.2014. Opublikovan 20.04.2016, Byul. 1. Patentoobladatel' FGBOU VPO Omskiy agrouniversitet i FGBU Tsentr agrokhimicheskoy sluzhby «Omskiy». [in Russian]

[Berezin, 2006](#) – *Berezin, L.V.* (2006). Melioratsiya i ispol'zovaniye solontsov Sibiri: monografiya [Land reclamation and use of Siberian solonchaks: a monograph]. Omsk: Izd-vo FGOU VPO OmGAU. 208 p. [in Russian]

[Berezin, 2010](#) – *Berezin, L.V.* (2010). Nauchnyye osnovy korrektyrovki pochvennykh kart na baze kosmicheskikh snimkov [Scientific basis for adjusting soil maps based on satellite imagery]. *Metodicheskoye obespecheniye monitoringa zemel' sel'. khoz. naznacheniya: Materialy Vserossiysk. nauch. konf. Pochv. in-t im. Dokuchayeva*. M. 235-240. [in Russian]

[Berezin, 2011](#) – *Berezin, L.V.* (2011). Ispol'zovaniye programmnoy kompleksa ENVI dlya pochvennogo deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [Using the ENVI software package for soil interpretation of satellite images]. *Geomatics*. 2: 90-91. [in Russian]

[Berezin, 2012](#) – *Berezin, L.V.* (2012). Avangard sibirskogo zemledeliya. K istorii zemledeliya Sibiri [Vanguard of Siberian agriculture. To the history of agriculture in Siberia]. Omsk: Izd-vo IP Maksheyevoy. 132 p. [in Russian]

[Berezin, 2013](#) – *Berezin, L.V.* (2013). Sposobnost' k pogloshcheniyu solnechnoy radiatsii pochvami i biotsenozami [The ability to absorb solar radiation from soils and biocenoses]. *Aktual'nyye problemy biologii, nanotekhnologii i meditsiny. Mat-ly V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Rostov-na-Donu*. 371-372. [in Russian]

[Berezin, 2014](#) – *Berezin, L.V.* (2014). Scientific Basis of the Adaptive Landscape Reclamation Farming Systems. *Biogeosystem Technique*. 1(1): 30-40. DOI: 10.13187/bgt.2014.1.30

[Berezin, 2015](#) – *Berezin, L.V.* (2015). Otrazheniye spektra solnechnoy radiatsii v ekosistemakh po materialam distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Reflection of the spectrum of solar radiation in ecosystems based on materials of remote sensing of the Earth]. *Vestnik Omsk. gos. agrarnogo un-ta*. 4 (20): 24-32. [in Russian]

[Berezin, Chemerylova, 2008a](#) – *Berezin, L.V., Chemerolova, V.A.* (2008). RIP – intellektual'nyi produkt (RIP), zaregistrirovannyi FGUP «VNTITs» 29.07.08 № 73200800079. Metodika ob'ektivnoi otsenki opredeleniya glyantsa (GLOW) pochvennykh strukturnykh agregatov i otbleska biogeotsenozov pri deshifirovanii spektrozonal'nykh kosmicheskikh i nazemnykh snimkov [RIP is an intellectual product (RIP) registered by FSUE VNTITs on July 29, 08, No. 73200800079. Methodology for an objective assessment of the gloss determination (GLOW) of soil structural aggregates and glare of biogeocenoses during interpretation of spectrozonal satellite and ground-based images]. [in Russian]

[Berezin, Chemerylova, 2008b](#) – *Berezin, L.V., Chemerolova, V.A. (2008). Otblesk kak pokazatel' otrazhatel'noi sposobnosti pochv [Glow as an indicator of the reflectivity of soils]. Materialy V s"ezda Vseross. obshchestva pochvovedov im. V.V. Dokuchaeva. Rostov-na-Donu. 232. [in Russian]*

[Berezin, Sergeyeva, 2007](#) – *Berezin, L.V., Sergeyeva, O.S. (2007). Nauchnyye osnovy monitoringa i protsessov degradatsii pochv s ispol'zovaniyem kosmicheskoy informatsii [The scientific basis of monitoring and soil degradation processes using space information]. Opustynivaniye zemel' i bor'ba s nim. Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po bor'be s opustynivaniyem. Abakan 16–19.05.06. 298-301. [in Russian]*

[Berezin, Shayakhmetov, 2012](#) – *Berezin, L.V., Shayakhmetov, M.R. (2012). Metodologicheskiye osnovy izucheniya prirodno-resursnogo potentsiala regiona [Methodological foundations of the study of the natural resource potential of the region]. Omskiy nauch. Vestnik. 1: 146-149. [in Russian]*

[Berezin, Shayakhmetov, 2018](#) – *Berezin, L.V., Shayakhmetov, M.R. (2018). Kosmicheskaya informatsiya – novyy put' otsenki plodorodiya pochv i razrabotki rekomendatsiy po melioratsii i primeneniyu udobreniy [Space information is a new way of assessing soil fertility and developing recommendations for land reclamation and fertilizer use]. Plodorodiye pochv i otsenka produktivnosti zemledeliya. VIII Sibirskiy Pryanishnikovskiy agrokhimicheskiye chteniya: materialy mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. Tyumen', 18–20 iyulya. [in Russian]*

[Birth, McVey, 1968](#) – *Birth, G.S., McVey, G.R. (1968). Measuring color of growing turf with a reflectance spectrometer. Agron. J. 60: 640-649.*

[Bolsunovskiy, 2009](#) – *Bolsunovskiy, M.A. (2009). Perspektivnyye napravleniya razvitiya distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Promising directions for the development of remote sensing of the Earth from space]. Geomatics. 2: 15. [in Russian]*

[Bower, Hanks, 1965](#) – *Bower, S.A., Hanks, R.J. (1965). Reflection of radiant energy from soil. Soils Sci. 100(2): 130-138.*

[Chen et al., 2005](#) – *Chen, D., Huang, J., Jackson, T.T. (2005). Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. Remote Sensing Environ. 96: 225-236.*

[Chen et al., 2014](#) – *Chen, Y., Lin, Z., Zhao, X., Wang, G., Gu, Y. (2014). Deep learningbased classification of hyperspectral data. IEEE J. Appl. Earth Obs. and Remote Sensing. 6: 2094-2107.*

[Clark, 2003](#) – *Clark, R.N. (2003). Imaging spectroscopy: earth and planetary remote sensing with the USGS tetracorder and expert systems. J. Geophys. Res. 108. 5131.*

[Clark, 2017](#) – *Clark, M.L. (2017). Comparison of simulated hyperspectral HypsIRI and multispectral Landsat 8 and Sentinel-2 imagery for multi-seasonal, regional land-cover mapping. Remote Sensing Environ. 200: 311-325.*

[Curran, 1993](#) – *Curran, P.J., Windham, W.R., Gholz, H.L. (1993). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll concentration in slash pine leaves. Tree Physiol. 15: 203-206.*

[Dits, 2003](#) – *Dits, L.Y. (2003). Metodologicheskiye aspekty landshpftno-indikatsionnogo izucheniya pochvennogo pokrova (na primere Barabinskoy lesostepi) [Methodological aspects of landscape-indicative study of soil cover (on the example of the Baraba forest-steppe)]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. 127 p. [in Russian]*

[Dits, Smolentsev, 2002](#) – *Dits, L.Y., Smolentsev, B.A. (2002). Geoinformatsionnyye sistemy v pochvennoy kartografii [Geographic information systems in soil cartography]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-niye, 78 p. [in Russian]*

[Dokuchayev, 1883](#) – *Dokuchayev, V.V. (1950). Po voprosu o sibirskom chernozeme. Sochinyeniya [On the issue of Siberian chernozem. Compositions]. T. 2. M.-L.: Izd-vo AN SSSR. 357-381. [in Russian]*

[Friedl, Brodley, 1997](#) – *Friedl, M.A., Brodley, C.E. (1997). Decision tree classification of land cover from remotely sensed data. Remote Sensing Environ. 61: 399-409.*

[Gamon et al., 1992](#) – *Gamon, J.A., Penuelas, J., Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sensing Environ. 41: 35-44.*

[Gindemit, 2007](#) – *Gindemit, A.M.* (2011). Vliyaniye priyemov melioratsii na svoystva i produktivnost' solontsovykh kompleksov lesostepnoy zony Omskogo Priirtysh'ya [The influence of land reclamation techniques on the properties and productivity of solonchic complexes of the forest-steppe zone of Omsk Irtysh]: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Tyumen'. 20. [in Russian]

[Gitelson et al., 2002a](#) – *Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., Rundquist, D.* (2002). Novel algorithm for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing Environ.* 80: 76-87.

[Gitelson et al., 2002b](#) – *Gitelson, A.A., Zur, Y., Chivkunova, O.B., Merzlyak, M.N.* (2002). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochem. Photobiol.* 75: 272-281.

[Gitelson, 2011](#) – *Gitelson, A.A.* (2011). In *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Eds *Thenkabail P.S., Lyon G.J. and Huete A.* CRC Press-Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, USA. 141-166.

[Gopp et al., 2008](#) – *Gopp, N.V., Smirnov, V.V., Kulikova, Ye.A.* (2008). Issledovaniye zakonmernostey lateral'noy differentsiatsii pochvennogo pokrova v zavisimosti ot faktorov pochvoobrazovaniya s ispol'zovaniyem mnogoazonal'nykh i radiolokatsionnykh snimkov [Study of the patterns of lateral differentiation of soil cover depending on soil formation factors using multizone and radar images]. *Materialy mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa «Geo-Sibir' – 2008»*. Novosibirsk. pp. 239-243. [in Russian]

[Gorshenin, 1928](#) – *Gorshenin, K.P.* (1928). Lektsii po pochvovedeniyu [Lectures on soil science]. Izd. Sib. in-t sel'. khoz-va i lesovodstva. Omsk. 158 p. [in Russian]

[Gorshenin, 1955](#) – *Gorshenin, K.P.* (1955). Pochvy yuzhnoy chasti Sibiri [Soils of the southern part of Siberia]. M.: Izd-vo AN SSSR. 592 p. [in Russian]

[Green, 1998](#) – *Green, R.O.* (1998). Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing Environ.* 65: 227-248.

[Green et al., 1988](#) – *Green, A.A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M.D.* (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 26: 65-74.

[Hardisky et al., 1983](#) – *Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M.* (1983). The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sensing.* 49: 77-83.

[Helmholz, 1854](#) – *Helmholz, H.* (1854). Die Wechselwirkung der Naturkräfte.

[Huete, 1997](#) – *Huete, A.R., Liu, H., Batchily, K., van Leeuwen, W.* (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing Environ.* 59: 440-451.

[Jacquemoud et al., 1995](#) – *Jacquemoud, S., Baret, F., Andrieu, B., Danson, F.M., Jaggard, K.* (1995). Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors. *Remote Sensing Environ.* 52: 63-172.

[Jacquemoud, 2009](#) – *Jacquemoud, S.* (2009). PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing Environ.* 113: S56-S66.

[Kanning et al., 2018](#) – *Kanning, M., Kühling, I., Trautz, D., Jarmer, T.* (2018). High-Resolution UAV-Based Hyperspectral Imagery for LAI and Chlorophyll Estimations from Wheat for Yield Prediction. *Remote Sens.* 10: 2000.

[Klassifikatsiya..., 2004](#) – *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of Russian soils]. Smolensk: Oykumena, 2004. 324 p. [in Russian]

[Kleyn, Berezin, 1917](#) – *Kleyn, N.A., Berezin, L.B.* (2017). Analiz podtopleniya zemel' po kosmicheskim snimkam – put' raskrytiya faktorov tekhnogennoy i prirodnoy bezopasnosti [Analysis of land flooding by satellite imagery is a way of revealing the factors of technogenic and natural safety]. *Sbornik nauchnykh rabot po materialam IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Tekhnogennaya i prirodnaya bezopasnost'»*. Saratov. 231-237. [in Russian]

[Klimat Omska, 1980](#) – *Klimat Omska* [The climate of Omsk]. L.: Gidrometeoizdat, 1980. 248 p. [in Russian]

[Knizhnikov et al., 2011](#) – *Knizhnikov, Yu.F., Kravcova, V.I., Tutubalina, O.V.* (2011). *Aerokosmicheskie metody geograficheskix issledovaniy* [Aerospace methods of geographical research: a textbook]. M.: Izd. centr «Akademiya». 416 p. [in Russian]

- [Kravtsova, 2005](#) – *Kravtsova, V.I.* (2005). Kosmicheskiye metody issledovaniya pochv [Space methods for soil research]. M.: Aspekt Press. 190 p. [in Russian]
- [Kussul et al., 2017](#) – *Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., Shelestov, A.* (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 14(5): 778-782.
- [Lomonosov, 1763](#) – *Lomonosov, M.V.* (1763). O sloyakh zemnykh. Pervyye osnovaniya metallurgii ili rudnykh del [On the layers of the earth. The first foundations of metallurgy or ore business]. SPb: tip. IAN, (1957). Pribavleniye 2. Soch. M.-L. 10: 237. [in Russian]
- [Lomonosov, 1957](#) – *Lomonosov, M.V.* (1957). Poln. sobr. soch. [Full composition of writings]. M., L. 10: 322-323. [in Russian]
- [Mal'tseva et al., 2019](#) – *Mal'tseva, L.T., Filippova, Ye.A., Bannikova, N.YU., Ionina, N.V.* (2019). Selektionnaya tsennost' ustoychivogo k bolezniam iskhodnogo materiala pshenitsy v usloviyakh Zaural'ya [The breeding value of disease-resistant source material of wheat in the Trans-Urals]. *Vestnik Omskogo GAU.* 1 (33): 21-30. [in Russian]
- [Meerdink, 2016](#) – *Meerdink, S.K.* (2016). Linking seasonal foliar traits to VSWIRTIR spectroscopy across California ecosystems. *Remote Sensing Environ.* 86: 322-338.
- [Melgani, Bruzzone, 2004](#) – *Melgani, F., Bruzzone* (2004). Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machine. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 8: 1778-1790.
- [Meyer, 1854](#) – *Meyer, G.F.* (1854). Geschichte der Botanik, Königsberg. Bd. 11.
- [Neustruyev, 1931](#) – *Neustruyev, S.S.* (1931). Elementy geografii pochv [Elements of soil geography]. M.-L. 216 p. [in Russian]
- [Nigam et al., 2019](#) – *Nigam, R., Tripathy, R., Dutta, S., Bhagia, N., Nagori, R., Chandrasekar, K., Kot, R., Bhattacharya, B.K., Ustin, S.* (2019). Crop type discrimination and health assessment using hyperspectral imaging. *Current Science.* 116(7,10): 1108-1123.
- [Orlov et al., 2001](#) – *Orlov D.S., Sukhanova N.I., Rozanova M.S.* (2001). Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' pochv i ikh komponentov. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2001. 176 p. [in Russian].
- [Orlov, 1982](#) – *Orlov, D.S.* (1982). Novyye problemy spektral'noy otrazhatel'noy sposobnosti pochv i landshaftov [New problems of spectral reflectivity of soils and landscapes]. *Pochvovedeniye.* 1: 117-119. [in Russian]
- [Ozdogan, Woodcock, 2006](#) – *Ozdogan, M., Woodcock, C.E.* (2006). Resolution dependent error in remote sensing of cultivated areas. *Remote Sensing Environ.* 103: 203-217.
- [Paola, Schowengerdt, 1995](#) – *Paola, J.D., Schowengerdt, R.A.* (1995). A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely sensed multi-spectral imagery. *Int. J. Remote Sensing.* 16: 3033-3058.
- [Peñuelas et al., 1994](#) – *Peñuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., Field, C.B.* (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves. *Remote Sensing Environ.* 48: 135-146.
- [Platonenko, 1982](#) – *Platonenko, M.A.* (1982). Ob informatsionnykh vozmozhnostyakh kosmicheskikh snimkov [On the information capabilities of satellite images]. Sozdaniye, matematicheskaya obrabotka geodezicheskikh setey sgushcheniya i sel'skokhozyaystvennoye kartografirovaniye. Om. s.-kh. in-t. Omsk. 39-42. [in Russian]
- [Pozherukova et al., 2019](#) – *Pozherukova, V.Ye., Shamanin, V.P., Gladkikh, M.S., Chursin, A.S., Gul'tyayeva, Ye.I.* (2019). Otsenka kolleksii sortov seti KASIB v usloviyakh yuzhnoy lesostepi Zapadnoy Sibiri [Assessment of the collection of varieties of the KASIB network in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia]. *Vestnik Omskogo GAU.* 1(33): 30-36. [in Russian]
- [Razumov, 2004](#) – *Razumov, V.I.* (2004). Kategorial'no-sistemnaya metodologiya v podgotovke uchenykh [Categorical-systemic methodology in the preparation of scientists]. Omsk: Izd-vo Omsk. gos. un-t. 227 p. [in Russian]
- [Rouse, 1974](#) – *Rouse, J.W., Has R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C.* (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III. Final report. Greenbelt. MD. 1974. 371 p.

Savich, 2006 – Savich, V.I. (2006). Agronomicheskaya otsenka otrazhatel'noy sposobnosti sistemy pochva-rasteniye metodom komp'yuternoy diagnostiki: metodicheskoye posobiye. M.: MSKHA. 75 p. [in Russian]

Semendyyeva et al., 2017 – Semendyyeva, N.V., Yelizarov, N.V., Galeyeva, L.P., Korobova, L.N. (2017). Dlitel'nost' deystviya khimicheskoy melioratsii na svoystva solontsov Barabinskoy ravniny [Duration of chemical reclamation on the properties of solonchaks of the Barabinskaya plain]: Monografiya. Novosibirsk: ITS NGAU «Zolotoy Kolos». 190 p. [in Russian]

Semenenko (Gindemit), 2007 – Semenenko (Gindemit), A.M. (2007). Effektivnost' dlitel'nogo deystviya gipsovaniya solontsov s razlichnym sodержaniyem obmennogo natriya [Efficiency of long-term gypsum plastering of solonchaks with different contents of exchangeable sodium]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konf. molodykh uchenykh SO RASKHN «Molodyye uchenyye – agrarnoy nauke» (4–5 iyulya 2007)*. Omsk: Sfera. pp. 169-176. [in Russian]

Semenenko (Gindemit), 2007 – Semenenko (Gindemit), A.M. (2007). Kategorial'no-sistemnyy podkhod k poznaniyu protsessa melioratsii solontsov [A categorical-systematic approach to understanding the process of reclamation of solonchaks]. *Trudy II Natsional'noy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Problemy istorii, metodologii i filosofii pochvovedeniya» (5–9 noyabrya 2007)*. Pushchino: izd-vo Instituta fiziko-khimicheskikh i biologicheskikh problem pochvovedeniya RAN, T. 2: 332-335. [in Russian]

Senebier, 1782 – Senebier, J. (1782). Physicochemical memoirs on the influence of sunlight on the modification of the beings of the three kingdoms of nature, and above all those of the vegetable kingdom. Geneva: Chez Barthelemi Chirol. In 3 volumes.

Sergeeva et al., 2008 – Sergeeva, O.S., Klimovich, D.A., Berezin, L.V. (2008). Patent RU № 2337518. Rossiyskaya Federatsiya. Sposob vneseniya organicheskikh udobrenij. zayavitel' i patentoobladatel' FGOU VPO OmGAU. Application from 11.12.2006. Published 10.11.2008. Bjul. № 31. [in Russian]

Sergeeva, Lysenko, 2004 – Sergeeva, O.S., Lysenko, I.V. (2004). O vozmozhnosti pochvennogo deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov ravninnoi territorii Zapadnoi Sibiri [On the possibility of soil interpretation of satellite images of the plains of Western Siberia]. *Prirodnye i intellektual'nye resursy Omskogo regiona: Mat. 1-i mezhvuz. nauch. studench. konf. Omsk, 55-59*. [in Russian]

Sergeyeva i dr., 2010 – Sergeyeva, O.S., Krasnitskiy, V.M., Berezin, L.V. (2010). Monitoring pochvennogo pokrova Zapadnoy Sibiri po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Monitoring of the soil cover of Western Siberia according to remote sensing data]. *Plodorodiye. 1(52): 7-8*. [in Russian]

Sergeyeva, 2007a – Sergeyeva, O.S. (2007). Vozmozhnost' ispol'zovaniya kosmicheskikh snimkov pri korrektsirovke pochvennykh kart v tselyakh ratsional'nogo ispol'zovaniya adaptivno-meliorativnykh sistem zemledeliya [The possibility of using satellite images when adjusting soil maps for the rational use of adaptive-reclamation systems of agriculture]. *Molodyye uchenyye – agrarnoy nauke : materialy Mezhdunar. nauch. konf. Omsk. pp. 177-183*. [in Russian]

Sergeyeva, 2007b – Sergeyeva, O.S. (2007). Metodologicheskiye aspekty spektral'noy otrazhatel'noy sposobnosti agrofitotsenozov [Methodological aspects of the spectral reflectivity of agrophytocenoses]. Organizatsiya pochvennykh sistem. Tr. II nats. konf. s mezhdunar. uchastiyem. Pushchino. pp. 377-380. [in Russian]

Sergeyeva, 2009 – Sergeyeva, O.S. (2009). Ispol'zovaniye spektral'noy otrazha-tel'noy sposobnosti agrofitotsenozov pri deshifirovanii kosmicheskikh snimkov v tselyakh ratsional'nogo ispol'zovaniya zemel'. Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya maloplodorodnykh zemel'. Mat. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Omsk. pp. 106-116. [in Russian]

Sergeyeva, 2011 – Sergeyeva O.S. (2011). Ispol'zovaniye spektral'noy otrazhatel'noy sposobnosti pochv i agrofitotsenozov dlya monitoringa plodorodiya pochv [Using the spectral reflectivity of agrophytocenoses in decoding satellite images for the rational use of land]. Avtoref. disser. na soiskaniye uch. stepeni kand. biol. nauk po spets. Tyumen'. 16 p. [in Russian]

Sergeyeva, Berezin, 2006 – Sergeyeva, O.S., Berezin, L.V. (2006). Nauchnyye osnovy monitoringa i protsessov degradatsii pochv s ispol'zovaniyem kosmicheskoy informatsii [Scientific basis of monitoring and soil degradation processes using space information]. *Materialy Mezhdunar. konf. po bor'be s opustynivaniyem. 16–19 maya. Abakan. pp. 298-303*. [in Russian]

[Sergeyeva, Gindemit, 2010](#) – *Sergeyeva, O.S., Gindemit, A.M.* (2010). Vliyaniye variantov sintezirovaniya kosmicheskikh snimkov sputnika Landsat-7 na izucheniye struktury pochvennogo pokrova solontsovykh kompleksov [The effect of synthesizing satellite images of the Landsat-7 satellite on the study of the soil cover structure of solonetz complexes]. *Vestn. Alt. gos. un-ta.* 1(63): 40-45. [in Russian]

[Shayakhmetov i dr., 2014](#) – *Shayakhmetov, M.R., Berezin, L.V., Balukov, M.S., Sergeyeva, A.Yu.* (2014). Izucheniye pogloshcheniya solnechnoy radiatsii pochvami i agrotseozami na osnove analiza kosmicheskoy informatsii [Studying the absorption of solar radiation by soils and agrocenoses based on the analysis of space information]. *Pochvovedeniye i agrokimiya.* 4: 92-102. [in Russian]

[Shayakhmetov, Berezin, 2012](#) – *Shayakhmetov, M.R., Berezin, L.V.* (2012). Metodologicheskiye osnovy izucheniya prirodno-resursnogo potentsiala regiona [Methodological foundations of the study of the natural resource potential of the region]. *Omskiy nauchnyy vestnik.* 1(108): 146-149. [in Russian]

[Sims, Gamon, 2002](#) – *Sim, D.A., Gamon, J.A.* (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing Environ.* 81: 337-354.

[Singh, Harrison, 1985](#) – *Singh, A., Harrison, A.* (1985). Standardized principal components. *Int. J. Remote Sensing.* 6: 883-896.

[Timiryazev, 1890](#) – *Timiryazev, K.A.* (1890). Zemledeliye i fiziologiya rasteniy [Agriculture and plant physiology]. Soch. M.:1937. T 3. 452 p. [in Russian]

[Timiryazev, 1948](#) – *Timiryazev, K.A.* (1948). Solntse, zhizn' i khlorofill [Sun, life and chlorophyll]. Predisloviye. Izbran. soch. M. T.1: 82-108. [in Russian]

[Tolchel'nikov, 1974](#) – *Tolchel'nikov, Y.S.* (1974). Opticheskiye svoystva landshafta [Optical properties of the landscape]. L.: «NAUKA». 251 p. [in Russian]

[Turner et al., 2004](#) – *Turner, D.P., Ollinger, S., Smith, M.-L., Krankina, O., Gregory, M.* (2004). Scaling net primary production to a MODIS footprint in support of Earth observing system product validation. *Int. J. Remote Sensing.* 25: 1961-1979.

[Varron, 1963](#) – *Varron, M.T.* (1963). Sel'skoye khozyaystvo [Agriculture]. M.-L.: AN SSSR. 216 p. [in Russian]

[Vinogradov, 1990](#) – *Vinogradov, B.V.* (1990). Aerokosmicheskiye metody v pochvovedenii i ikh ispol'zovaniye v sel'skom khozyaystve [Aerospace methods in soil science and their use in agriculture]. M.: Nauka. 247 p.

[Volobuyev, 1974](#) – *Volobuyev, V.R.* (1974). Vvedeniye v energetiku pochvo-obrazovaniya [Introduction to the energy of soil formation]. M. 128 p. [in Russian]

[Voropayeva, 1990](#) – *Voropayeva, Z.I.* (1990). Osobennosti solevogo rezhima i dinamiki obmennykh osnovaniy meliorirovannykh solontsov Zapadnoy Sibiri [Features of the salt regime and dynamics of the exchange bases of reclaimed solonetz of Western Siberia]: avtoref. dis... kand. biol. nauk. Novosibirsk. 21. [in Russian]

[Xu et al., 2018](#) – *Xu, X., Li J., Wu, C., Plaza, A.* (2018). Regional clustering-based spatial preprocessing for hyperspectral unmixing. *Remote Sensing Environ.* 204: 333-346.

[Yeremchenko, 1997](#) – *Yeremchenko, O.Z.* (1997). Prirodno-antropogennyne imeneniya solonovykh pochv v Yuzhnom Zaural'ye [Natural and anthropogenic changes in solonetzic soils in the South Trans-Urals]. Perm': Izd-vo Perm. un-ta. 317 p. [in Russian]

[Yonezawa, 2007](#) – *Yonezawa, C.* (2007). Maximum likelihood classification combined with spectral angle mapper algorithm for high resolution satellite imagery. *Int. J. Remote Sensing.* 28: 3729-3737.

[Yushkevich, Berezin, 2001](#) – *Yushkevich, L.V., Berezin, L.V.* (2001). Agroklimati-cheskiye usloviya vzdelyvaniya zernovykh kul'tur [Agroclimatic conditions for the cultivation of grain crops]. *Priroda, prirodopol'zovaniye i prirodoobustroystvo Omskogo Priirtysh'ya: Materialy III nauchno-prakticheskoy konferentsii.* Omsk. pp. 269-273. [in Russian]

[Zarco-Tajadaa et al., 2013](#) – *Zarco-Tajadaa, P.J., Guillin-Climenta, M.L., Hernandez-Clemente, R., Catalina, A.* (2013). Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imaging acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agric. For. Met.* 17: 281-294.

Thenkabail et al., 2004 – Thenkabail, P.S., Enclona, E.A., Ashton, M.S., Van Der Meer, V. (2004). Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing Environ.* 91: 354-376.

Timiryazev, 1903 – Timiryazev, K.A. (1903). The Cosmical Function of the Green Plant. *Proceedings of the Royal Society*. Vol. 72.

Усовершенствованная методология анализа космической информации о солнечной энергии поглощаемой наземными экосистемами

Леонид Владимирович Березин ^{a,*}

^a Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Российская Федерация

В статье излагаются принципы использования космических снимков путем анализа поглощения полного спектра солнечной радиации, включая и ближний, и средний инфракрасный диапазоны, который в настоящее время могут использовать любые землепользователи.

Начиная с 1980 г. эту методику стали изучать американские исследователи A. Gitelson et al. и P.S. Thenkabail et al. на основе использования лабораторных спектрометров путем изучения площади листового аппарата растений, содержания в растениях воды, хлорофилла и других компонентов, а также для диагностики заболевания пшеницы ржавчиной (*Rustinia*). С 2010 они стали устанавливать эти приборы на беспилотные летательные аппараты (БПЛА), а затем на самолеты. В 2015–2017 гг. американские исследователи совместно с индийскими учеными, провели по такой методике съемку отдельных участков однолетних и многолетних полевых культур ряда регионов Индии. Эту же методику применили немецкие исследователи, изучая систему применения удобрений пшеницы.

Российские ученые Омского государственного аграрного университета уже в 1980 г. обосновали возможность изучения этих же вопросов по космическим снимкам, а с 2004 г. стали применять их усложненный анализ путем кластеризации изображений в различных природных зонах Среднего Прииртышья. Было установлено, что наиболее информативен средний инфракрасный диапазон спектра солнечной радиации, который позволяет различать из космоса и полевые культуры, и типы почв. При этом была установлена возможность диагностики состояния автоморфных и гидроморфных агроэкосистем, как при использовании в полевых севооборотах, так и в залежном состоянии. Выявлены факторы, определяющие целесообразность и очередность повторного освоения в пашню залежных земельных массивов.

Ключевые слова: космическая съемка, солнечная радиация, спектральный анализ поглощения солнечной энергии экосистемами, повторное освоение залежных массивов.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: docberезin@yandex.ru (Л.В. Березин)