

# Методология мониторинга качества и плодородия почв виноградных агроценозов на основе мультиспектральных космических данных

**Гришин И.Ю.<sup>1</sup>,**  
доктор технических наук,  
профессор,  
член-корреспондент РАН

**Тимиргалеева Р.Р.<sup>1,2</sup>,**  
доктор экономических наук,  
профессор,  
член-корреспондент РАН

<sup>1</sup> Филиал Московского  
государственного университета  
им. М.В. Ломоносова,  
г. Севастополь, Крым

<sup>2</sup> Гуманитарно-педагогическая  
академия Крымского  
федерального университета  
им. В.И. Вернадского,  
г. Ялта, Крым

УДК 629.785:528.8.04







Рассмотрены пути разработки и внедрения технологий комплексного информационного обеспечения и мониторинга крупных сельхозплощадей. Данные инновации нужны для получения базовых тематически ориентированных средств решения задач управления устойчивым развитием территорий. Такой процесс предполагает задействование результатов космической деятельности на Земле и в условиях ЭкоКосмоДома (ЭКД). Применение этих технологий позволит при создании набора задач мониторинга с использованием результатов космической деятельности, получивших название «базовые элементы», регламентировать разработку методик контроля содержания гумуса в почве. Подобный подход будет способствовать сокращению времени, необходимого на разработку базовых элементов, а также созданию на их основе системы космического мониторинга для решения задач в разных отраслях экономики. Представлена методика анализа плодородия почв на примере виноградных агроценозов, предполагающая определение содержания гумуса дистанционными способами, которые основаны на оценке спектральных характеристик почв. Исследование проведено с помощью съёмки цифровой камерой, а также спутниковой мультиспектральной аппаратурой. Предложенные методы определения содержания гумуса в почве обладают высокой точностью и могут применяться для создания автоматизированной системы мониторинга состояния почв, в том числе для ведения точного земледелия в замкнутых экосистемах.

***Ключевые слова:** геоинформационная платформа, гумус, дистанционное зондирование Земли, интеллектуальная система, мультиспектральная съёмка, ЭкоКосмоДом (ЭКД).*



## Введение

В условиях ЭкоКосмоДома (ЭКД) имеется необходимость в производстве растительной продукции, когда в качестве основного субстрата для культивирования растений планируется использовать лёгкие почвогрунты [1]. Данные субстраты содержат около 10 % гумуса по объёму; эта характеристика – одна из важнейших, и её нужно постоянно контролировать для поддержания биоценоза в балансе. На текущий момент для анализа содержания гумуса в почве, а значит, её плодородия, применяются химические методы, которые являются точными, однако требуют физического отбора проб с участка, а также специального оборудования и дополнительного персонала. В настоящей статье для оптимизации процессов биотехнологического производства растительной продукции предлагается проводить мониторинг содержания гумуса на основе мультиспектральных данных. Указанная технология (при получении снимков из космоса) может быть с успехом использована в том числе для мониторинга состояния почв на поверхности Земли.

Сегодня спутниковые технологии наблюдения позволяют получать объективную количественную информацию о различных объектах и явлениях. Это, в частности, обуславливает создание новых информационных технологий и систем для изучения различных процессов, происходящих в биогеоценозах и агроценозах. В то же время следует отметить, что наблюдение за различными видами агроценозов имеет свою специфику, которая требует разработки специализированных информационных систем, предусматривающих сбор и анализ однородной по времени и пространству информации. Это особенно важно, когда речь идёт об изучении виноградных агроценозов, поскольку их главными элементами являются многолетние растения, а также почвы, способствующие получению качественного урожая. В данном случае необходимо создавать специальные информационные технологии мониторинга за подобными объектами, что позволит в перспективе формировать наблюдения, однородные по времени и пространству, и обеспечивать возможность проведения анализа, обладающего высокой степенью достоверности [2]. При этом должны быть определены различные характеристики исследуемых объектов, параметры которых могут быть восстановлены на основе данных дистанционных наблюдений и использованы для оценки их состояния и прогнозов развития. После того как начнёт функционировать космическое индустриальное ожерелье «Орбита» (КИО «Орбита»), на основе мультиспектральных космических данных возможно также

проведение постоянного мониторинга состояния почв на нашей планете.

Вопросам сохранения и восстановления плодородия агроценозов посвящено значительное количество трудов отечественных [3–7] и зарубежных [8–12] учёных и исследователей. Имеются работы, рассматривающие дистанционную оценку состояния почв; некоторые эксперты применяли результаты дистанционного зондирования Земли из космоса для мониторинга плодородия почв, почвенного картографирования, а также состояния виноградников.

В институтах Российской академии наук и Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова в последнее десятилетие предложены уникальные методы, алгоритмы и технологии работы со спутниковыми данными, что позволило решить существенное число научных задач и создать прикладные системы дистанционного мониторинга [13].

В [14] показано применение дистанционного зондирования для анализа терруара в виноградарстве и описаны методы объектного анализа изображений, пространственно-временного и гиперспектрального анализа и топоклиматологии.

Необходимо отметить, что в имеющихся публикациях отсутствуют комплексные исследования, направленные как на выявление и обоснование значимых факторов (показателей), которые обуславливают плодородие виноградных агроценозов, так и на разработку методов их оценки на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса, а также на построение комплексных моделей развития подобных агроценозов и организацию мероприятий по улучшению или сохранению почв в условиях юга России.

## Материалы и методы

Интенсивное использование земель часто ведёт к развитию неблагоприятных процессов (водная и ветровая эрозия, вторичное засоление и заболачивание, загрязнение почв промышленными выбросами и пестицидами), что существенно ухудшает свойства почвенного покрова. В связи с этим возникает необходимость слежения за показателями состояния почвы с целью её оценки, прогнозирования и картографирования, а также обоснования мероприятий по повышению плодородия. Мониторинг почвенного покрова включает систематические наблюдения за уровнем его загрязнения, процессами миграции химических веществ, динамикой показателей почвенного плодородия



в пространстве и во времени. Однако данный процесс не может ограничиться лишь исследованием проб почв, так как он неотделим от изучения других компонентов ландшафта, всех путей накопления загрязняющих веществ как в природных, так и в антропогенных комплексах.

В подавляющем большинстве случаев важнейшей комплексной характеристикой плодородия почвы служит содержание органического вещества в ней и его качественное состояние. При этом известно, что свойства, состав и количество органического вещества определяют биологические показатели плодородия почвы, наличие агрономически ценных почвенных микроорганизмов. Гумус составляет 85–90 % органического вещества почвы. Гумусовые вещества представляют собой тёмноокрашенные высокомолекулярные соединения, имеющие сложную химическую структуру. Типы почв различаются по содержанию гумуса, количеству и соотношению гуминовых кислот и фульвокислот, что существенно влияет на их отражательную способность в различных диапазонах электромагнитных волн.

Главным морфологическим признаком почвы считается её окраска, которая зависит от химического состава, и прежде всего от содержания гумуса. Имеется достаточное количество публикаций, посвящённых разработке и изучению способов оценки состояния растительного покрова методами дистанционного зондирования. Однако данные подходы ориентированы на применение в лабораторных

условиях и обладают высокой вычислительной трудоёмкостью для использования в реальных информационных системах мониторинга качества почв.

Именно поэтому в настоящей работе предпринята попытка разработки основ методологии оценки гумусированности на примере виноградных агроценозов. При этом оценка гумусированности проводилась как в лабораторных условиях, так и посредством космической спектральной съёмки.

Объектами исследований на первом этапе стали почвы виноградных агроценозов южных регионов России. Характеристика почвенного покрова и географические данные приведены в таблице 1.

В каждом случае отбор проб производился из верхнего слоя (глубина – 5–15 см). Содержание гумуса определялось по методу И.В. Тюрина в соответствии с ГОСТ 26213-91 «Почвы. Методы определения органического вещества».

Спектральные характеристики исследуемых почв определялись с помощью аппаратуры мультиспектральной съёмочной системы (спектральный диапазон – 460–860 нм) спутника «Канопус-В» (проведение съёмки синхронизировано со временем отбора образцов почв; использованы архивные данные), а также в лабораторных условиях с применением цифровой фотокамеры Canon DS126181. Фокусное расстояние объектива фотокамеры – 55 мм, разрешение – 4272 × 2848 пикселей, спектральный диапазон матрицы – 400–780 нм.

Таблица 1 – Характеристика участков и почвы

Номер образца	Хозяйство, участок	Описание почвы	Тип почвы
1	С. Благодатное, АПФ «Золотая балка», Балаклавский р-н г. Севастополя, Крым. Сорт винограда – «шардоне»	Рельеф – волнистая равнина; гумус (слой 0–20 см) – 1,2%; материнская порода – делювий; вскипание HCl – с поверхности; засоление – нет; pH – 6,9; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 1,4 мг/100 г почвы; K <sub>2</sub> O – 17,5 мг/100 г почвы; Ca – 19,4 мг/100 г почвы	Чернозём южный слабогумусный высококарбонатный
2	С. Вилино, АПФ «Золотая балка», Бахчисарайский р-н, Крым. Маточник сорта винограда «кобер»	Рельеф – понижение; гумус (слой 65 см) – 1,55%; материнская порода – делювий; вскипание HCl – с поверхности; засоление – нет; pH – 8; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – 0,9 мг/100 г почвы; K <sub>2</sub> O – 20,1 мг/100 г почвы; Ca – 14,5 мг/100 г почвы	Чернозём южный слабогумусный
3	С. Вилино, АК «Магарач», Бахчисарайский р-н, Крым	Карбонаты (слой 0–60 см) – около 7%, (слой 1,5 м) – 17–19%; содержание гумуса в почвенном профиле – 2,5%; pH – 8,1; объёмный вес почвы (верхний горизонт) – 1,29–1,33 г/см <sup>3</sup> ; общий азот (на глубине плантажа) – 0,12–0,13 %	Чернозём южный слабогумусный
4	С. Угловое, АФ «Черноморец», Бахчисарайский р-н, Крым. Сорт винограда – «пино-нуар», «каберне-совиньон»	Гумусовый горизонт – 80–90 см; гумус (слой 0–20 см) – 3,5%; валовый азот – 0,21–0,3%; гидролизующий азот – 5–11 мг/100 г почвы, что свидетельствует о высокой обеспеченности подвижным азотом	Чернозём обыкновенный мицеллярно-карбонатный предгорный



Для дешифрования из 22 полигонных участков отобраны четыре, не занятые растительностью. Кроме того, на момент отбора проб и космической съёмки отсутствовали атмосферные помехи.

Анализ данных архивов метеостанций показал, что поверхностные слои почвы всех четырёх исследуемых участков находились в воздушно-сухом состоянии. Такое обстоятельство позволило не учитывать влияние влажности почвы на её цвет при дешифровании и последующем анализе.

Образцы почв, предназначенные для фотографирования в лабораторных условиях, предварительно высушивались до воздушно-сухого состояния, а также измельчались до размера 0,2–0,25 мм.

При проведении съёмки применялось искусственное освещение со стабилизированным источником напряжения, обеспечивающим точность питающего напряжения  $\pm 1\%$ .

Образец почвы насыпался в стеклянную кювету, уплотнялся и выравнивался. Эталонный белый образец размещался рядом и в дальнейшем использовался для коррекции баланса белого при подготовке к съёмке и обработке снимка.

Полученные в ходе съёмки изображения в форматах RAW (цифровая фотокамера) и GeoTIFF (снимки со спутника) для последующего анализа обрабатывались с помощью программного комплекса SIPS и графического редактора Photoshop CS6, которые позволяют определять среднее значение яркости в спектральных каналах (R, G, B). Для повышения достоверности изображения выдавались автоматической серией по пять снимков, а затем усреднялись. Спектральные коэффициенты рассчитывались относительно яркости эталона, их усреднённые значения показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Спектральные характеристики почв

Номер образца	R	G	B	Содержание гумуса, %
1	75,6	65,1	51,2	1,2
2	76,1	67,3	53,6	1,55
3	64,3	52,9	42,1	2,5
4	62,9	56,8	45,7	3,5

## Результаты и обсуждение

Анализ данных, полученных в процессе эксперимента, целесообразно провести по итогам как лабораторной съёмки цифровой фотокамерой, так и дистанционного зондирования со спутника.

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что по результатам лабораторных исследований наибольшее значение яркости наблюдается в красном диапазоне (R), самое низкое – в синем диапазоне (B). Сравнительные характеристики приведены на рисунке 1.

Анализ результатов статистической обработки данных лабораторных съёмок позволяет утверждать, что наибольшая корреляция отмечается между содержанием гумуса ( $H$  – *humus*) и яркостью красного канала цифрового

снимка, величина коэффициента корреляции составляет  $r = -0,93$ . Таким образом, канал R является самым информативным для мониторинга уровня наличия гумуса в почве.

Для оптимальной оценки гумусированности почвы получено аналитическое выражение (уравнение регрессии) зависимости содержания гумуса в почве от уровня яркости канала R:

$$H = -0,136R + 11,651. \quad (1)$$

При этом  $r^2 = 0,87$ , что свидетельствует о высоком уровне корреляции; стандартная ошибка  $m = 2,6$ . Значения величины  $H$ , рассчитанные по уровню R в соответствии с (1), приведены на рисунке 2.

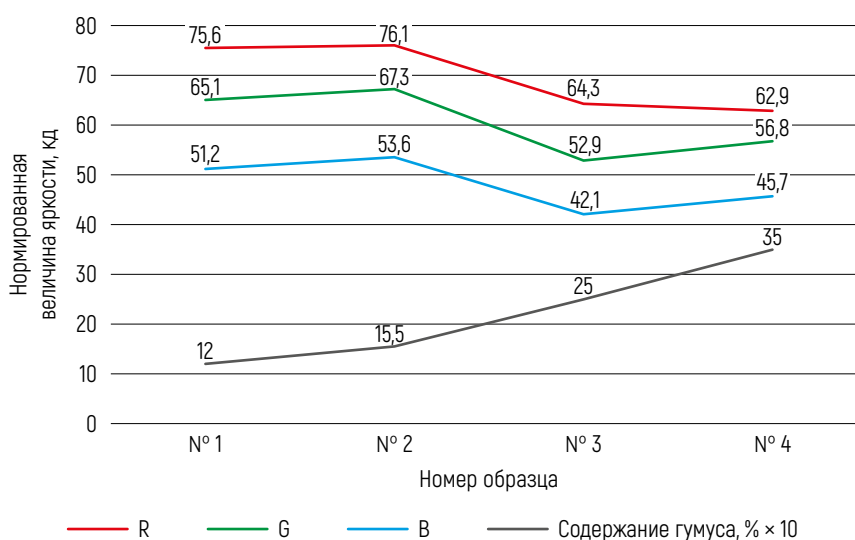


Рисунок 1 – Значения яркости каналов и содержание гумуса

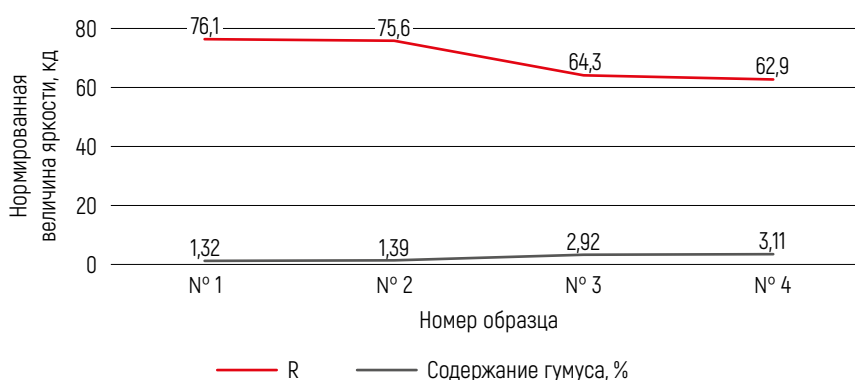


Рисунок 2 – Яркость канала R и расчётные значения содержания гумуса

Кроме того, посредством мультиспектральной аппаратуры спутника «Канопус-В» получены космические снимки анализируемых участков (рисунок 3).



Рисунок 3 – Космические снимки анализируемых участков: а – образец № 1; б – образцы № 2–4

С космическими снимками проведены аналогичные рассмотренным выше действия, связанные с предварительной обработкой фотографических изображений и статистическим анализом результатов. Получена следующая регрессионная зависимость:

$$H = -0,011R + 9,21. \quad [2]$$

Статистические показатели регрессионной зависимости:  $r^2 = 0,79$ , что свидетельствует о высоком уровне корреляции; стандартная ошибка  $m = 4,7$ , что позволяет утверждать о достаточно хорошем приближении реальных результатов рассчитанной регрессии (рисунок 4).

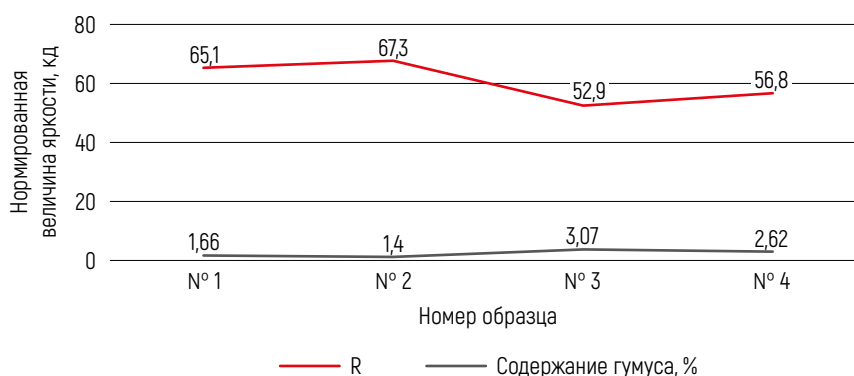


Рисунок 4 – Яркость канала R и расчётные значения содержания гумуса (на основании космических снимков)

Из анализа установленных данных следует, что погрешность величины содержания гумуса не превышает 20 % (для лабораторных снимков – 8,5 %). Такие значения указывают на возможность осуществления рассматриваемого дистанционного мониторинга.

Необходимо отметить, что в работе показаны только первые результаты дистанционного мониторинга плодородия виноградных агроценозов. В последующем планируется развернуть больше полигонов для отбора проб и дистанционной диагностики. Для определения спектральных свойств почв предполагается задействовать мобильный спектрометр, позволяющий производить замеры прямо в поле, исходя из предварительных прогнозов контроля заданных территорий требуемыми спутниками, а также прогнозов погоды. Более достоверные результаты могут быть достигнуты при использовании снимков, полученных с помощью специальной аппаратуры спутников, что даёт возможность выделить более узкие, особо информативные участки спектра.

## Выводы и дальнейшие направления исследования

В результате проведённых исследований может быть сделан вывод о достаточно высокой эффективности космических и лабораторных методов измерения спектральной отражающей способности почв для анализа их плодородия путём дистанционного определения содержания гумуса в них.

Разработана методика применения современной цифровой камеры для установления содержания гумуса в почве. Выявлено, что точность определения указанной величины практически соответствует аналитическим методам.

Однако при этом необходимо отметить важность проведения данных измерений непосредственно в поле, что возможно при использовании мобильных спектрометров. Показано, что для вычисления величины гумусированности почв в южных регионах России целесообразно задействовать спектр красного канала фотоснимка цифровой камеры.

Внедрение аналогичной методики для обработки и интерпретации космических снимков также позволяет с достаточной точностью выявлять процентное содержание гумуса в почве. Данный метод мониторинга следует считать наиболее оптимальным, поскольку он требует меньших трудозатрат для осуществления непрерывного наблюдения за состоянием почвенного покрова виноградных агроценозов и может быть положен в основу автоматического анализа качества почв.

Учитывая относительно небольшое количество обораживания, которое задействовано при мониторинге состояния почв, предложенную методику с успехом можно применить в условиях ЭКД. Анализ мультиспектральных показателей позволит проводить соответствующую дозировку гумуса, жидкого гумуса в различные зоны культивирования растений для получения оптимальных результатов.

В ходе дальнейших исследований целесообразно перейти от мультиспектральных методов мониторинга к гиперспектральным, что может повысить точность и качество наблюдений.

## Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-016-00220.

## Литература

1. Юницкий, А.Э. Струнные транспортные системы: на Земле и в Космосе: науч. издание / А.Э. Юницкий. – Силакрогс: ПНБ принт, 2019. – 576 с.: ил.
2. Grishin, I. Remote Sensing: The Method of GIS Application for Monitoring the State of Soils / I. Grishin, R. Timirgaleeva // *E3S Web of Conf.* – 2020. – Vol. 175, No. 06009. – P. 1–15.
3. Блохина, С.Ю. Применение дистанционного зондирования в точном земледелии / С.Ю. Блохина // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* – 2018. – № 5. – С. 10–16.
4. Ергина, Е.И. Динамика термодинамических свойств и запасов энергии в гумусе почв Крымского полуострова /

*Е.И. Ергина // Геополитика и экогеодинамика регионов.* – 2012. – № 8 [1–2]. – С. 62–72.

5. Кирюшин, В.И. Проблема минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследований / В.И. Кирюшин // *Земледелие.* – 2013 – № 7. – С. 3–6.
6. Козубенко, И.С. Спутниковые данные в управлении агропромышленным комплексом региона / И.С. Козубенко, И.Ю. Савин // *Вестник российской сельскохозяйственной науки.* – 2017. – № 5. – С. 9–11.
7. Кулик, К.Н. Методическая основа агролесомелиоративной оценки защитных лесных насаждений по данным дистанционного мониторинга / К.Н. Кулик, А.В. Кошелев // *Лесотехнический журнал.* – 2017. – № 3. – С. 107–114.
8. Elbasiouny, H. Assessment of Environmental Sensitivity to Desertification, Soil Quality and Sustainability in an Area of the North Nile Delta, Egypt / H. Elbasiouny // *Egyptian Journal of Soil Science.* – 2018. – Vol. 58, No. 4. – P. 399–415.
9. Chervan', A. The Assessment of Resource Potential of Agro-Landscapes with Use of Geo-Information Systems on the Basis of Soil Cover Structure / A. Chervan' // *The Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Soil Science Congress on "Environment and Soil Resources Conservation", Almaty, 17–19 Oct. 2018 / Soil Science Society of Kazakhstan Cooperation with the Federation of Eurasian Soil Science Societies; eds: A. Saparov, R. Kizilkaya, M. Mustafayev.* – Almaty: Poligrafservis i K, 2018. – P. 19.
10. Bonfante, A. Refining Physical Aspects of Soil Quality and Soil Health when Exploring the Effects of Soil Degradation and Climate Change on Biomass Production: An Italian Case Study / A. Bonfante, F. Terribile, J. Bouma // *SOIL Discussions.* – 2019. – No. 5. – P. 1–14.
11. Von Braun, J. Land Use Change and Economics of Land Degradation in the Baltic Region / J. von Braun, A. Mirzabaev // *Baltic Region.* – 2016. – Vol. 8, No. 3. – P. 33–44.
12. Nature-Similar Technologies of the Biogeosystem Technique in Solving a Global Social and Environmental Problem / A.P. Glinushkin [et al.] // *Biogeosystem Technique.* – 2018. – Vol. 5, No. 2. – P. 164–196.
13. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач / Е.А. Лупян [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2012. – Т. 9, № 5. – С. 21–44.
14. Hall, A. Remote Sensing Application for Viticultural Terroir Analysis / A. Hall // *Elements.* – 2018. – Vol. 14, No. 3. – P. 185–190.