

Определение линии почв по данным VIIRS на основе карты чистых паров MODIS и итеративного поиска уравнения регрессии

Д. Е. Плотников¹, Е. С. Ёлкина^{1,2}, П. А. Колбудаев¹, М. А. Бурцев¹,
А. М. Матвеев¹, А. М. Константинова^{1,2}

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

² Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма Симферополь,
295043, Россия

В сообщении описываются новые ежедневные безоблачные продукты серии TSE (англ. Time Series Enhancement) для перпендикулярного вегетационного индекса PVI (англ. Perpendicularly Vegetation Index), основанного на новом уравнении для линии почв, полученного по данным продуктов V*09GA (VNP09GA и VJ109GA) Collection 2 приборов VIIRS (англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на аппаратах серии NOAA и SNPP. Для идентификации участков открытых почв при построении уравнения применялась маска чистых паров за 2022 г., регулярно обновляемая по данным MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для пахотных земель всей территории России. В работе был использован метод итеративного поиска уравнения почвенной линии из-за невозможности прямого применения карты чистых паров для продуктов VIIRS по причине некратных различий пространственного разрешения приборов MODIS и VIIRS, а также в целях минимизации погрешностей соотнесения объектов и их яркости ввиду значительных ошибок привязки 500-метрового продукта V*09GA. Использовались восстановленные ежедневные безоблачные изображения VIIRS (продукт Historical TSE) в красном и ближнем инфракрасном каналах, а также соответствующие им изображения вегетационного индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index). В процессе анализа соответствующего открытых почвам облака точек в пространстве измерений в красном и ближнем инфракрасном каналах VIIRS происходила итеративная фильтрация выбросов с применением в качестве границ облака доверительных интервалов на уровне 0,95 и контролем сходимости для обоих коэффициентов получаемой прямой до порогового уровня различий менее 1 %. После достижения сходимости найдено окончательное уравнение линии почв по данным VIIRS продуктов V*09GA Collection 2 с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,973$, которое было использовано в формуле для расчёта индекса PVI по данным соответствующих продуктов VIIRS Collection 2.

Ключевые слова: VIIRS, HiTSE, LOWESS, линия почв, вегетационные индексы, итеративный поиск, доверительные интервалы

Одобрена к печати: 27.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-412-418

Введение

Концепция линии почв часто используется для спутникового мониторинга сельскохозяйственных культур на больших территориях, упрощая отделение динамичного сигнала растительности от фоновых спектральных характеристик подстилающей поверхности (Baret et al., 1993). Линия почв лежит в основе почвенно-адаптивных вегетационных индексов, которые позволяют точнее определять фенологические фазы, начало и окончание вегетационного сезона, а также, ввиду универсальности при работе на больших территориях и различных сезонах, обеспечивать корректное сопоставление характеризующих сигнал только от фитомассы абсолютных значений индекса для объектов, разделённых во времени и пространстве (Плотников и др., 2010; Baret et al., 1993; Tiruneh et al., 2022). Изменение спектрально-отражательных характеристик почв при увлажнении происходит в направлении вдоль линии почв, что позволяет эффективно применять почвенно-адаптивные индексы для объективного количественного мониторинга орошаемых земель и дистанционного контроля процессов

орошения, поскольку указанные индексы обеспечивают отделение сигнала зелёной массы растений от меняющегося в процессе полива спектрального сигнала почвы. Кроме этого, в практике орошаемого земледелия чистые пары не используются, поэтому возможность обнаружения этого состояния позволяет разделить богарные и орошающие земли.

Временные серии спутниковых измерений широко применяются во множестве задач дистанционной оценки характеристик растительности, в том числе для распознавания культур и типов землепользования (Дунаева и др., 2019; Ёлкина и др., 2024; Плотников и др., 2020а), определения состояния растительного покрова (Князева и др., 2021; Лупян и др., 2018; Плотникова и др., 2019; Середа и др., 2020; Трошко и др., 2021), при измерении биофизических характеристик (Плотников и др., 2025б; Шабанов и др., 2018; Plotnikov et al., 2022) и др. Они также востребованы для оперативного распознавания и оценки состояния культур и групп культур на больших территориях (Плотников и др., 2018, 2020б, 2024), включая распознавание участков чистого пара (Плотников и др., 2010). В настоящем сообщении описывается применение восстановленных рядов спутниковых данных высокого временного разрешения по данным продуктов V*09GA (VNP09GA и VJ109GA) Collection 2 в целях построения линии почв в пространстве измерений в красном (RED) и ближнем инфракрасном (*англ. near infrared — NIR*) каналах VIIRS (*англ. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), которая далее использовалась для формирования коллекции ежедневных продуктов серии TSE (*англ. Time Series Enhancement*) перпендикулярного вегетационного индекса PVI (*англ. Perpendicular Vegetation Index*) по данным прибора VIIRS.

Данные

В работе применялась карта чистых паров за 2022 г., создаваемая на ежегодной основе в Институте космических исследований РАН для территории пахотных земель России по данным приборов MODIS (*англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (*рис. 1*). Кроме этого, для построения двумерного облака в пространстве измерений в красном и ближнем инфракрасном каналах использовались мультиспектральные данные продуктов HiTSE (*англ. Historical Time Series Enhancement*), полученные в результате восстановления сезонных рядов безоблачных измерений коэффициентов спектральной яркости высокого временного разрешения на базе исходных данных.

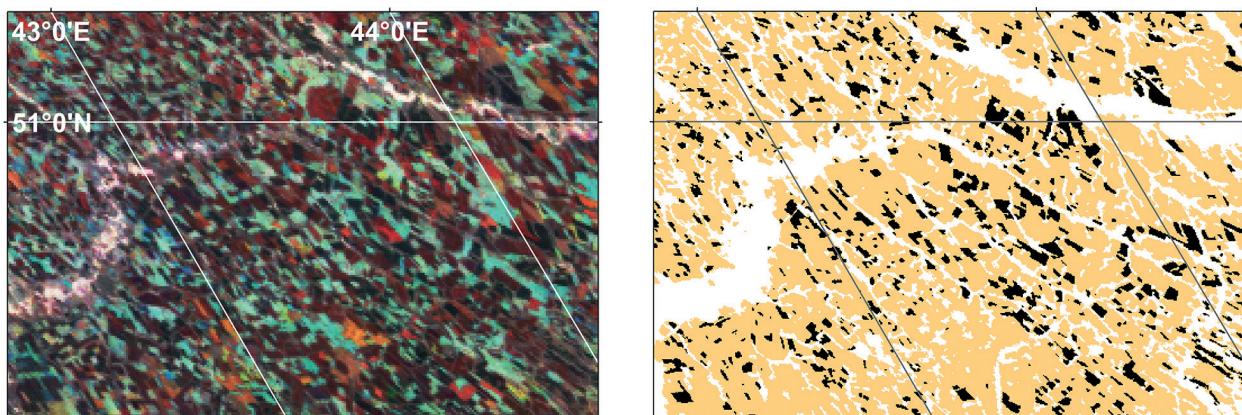


Рис. 1. Разновременной синтез ежедневных продуктов HiTSE NDVI (*англ. Normalized Difference Vegetation Index*) по данным VIIRS (R — 1 июля, G — 20 июля, B — 10 августа 2022 г.) (*слева*) и карта чистых паров (чёрный цвет) на фоне карты используемой пашни (оранжевый цвет) по данным MODIS (*справа*) для территории части Саратовской и Волгоградской областей в исходной синусоидальной проекции

Восстановленные мультиспектральные безоблачные изображения HiTSE для прибора VIIRS создаются в потоковом режиме для территории России с ежедневным времененным раз-

решением с применением алгоритма весовой скользящей интерполяции LOWESS (Plotnikov et al., 2022) на базе ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019). Входные спутниковые продукты из обоих источников покрывали изображениями территорию континентального охвата, характеризуемую высокой неоднородностью физико-географических условий, в течение полного сезона 2022 г.

Метод

Сначала пространственное разрешение карты чистых паров по данным MODIS было уменьшено в два раза — до разрешения VIIRS — методом ближайшего соседа, в результате чего была получена черновая версия карты чистых паров с разрешением VIIRS. Далее, в целях создания выборки для построения двумерного облака точек открытой почвы в пространстве измерений в красном и ближнем инфракрасном каналах прибора VIIRS использовался регулярный сэмплинг по черновой карте чистых паров VIIRS с шагом 5×5 пикселей (т. е. $2,5 \times 2,5$ км). Каждому сэмплу соответствовала тройка значений RED, NIR, NDVI в интервале дат от 100-го до 300-го дня года с шагом 10 дней (всего 21 временной срез), охватывающем для регионов чистого пара бесснежный период 2022 г. Для минимизации влияния на статистику яркости смешанных пикселей VIIRS при анализе сезонного временного ряда NDVI каждого сэмпла были оставлены 10 % троек измерений, соответствующих минимальным значениям NDVI в течение бесснежного интервала. Это позволило исключить индивидуально для каждого сэмпла временные срезы, заведомо не соответствующие безрастительному состоянию участка под паром (например, до момента его распашки под пар или, наоборот, после осеннего сева озимых на поле, бывшем под паром в летний период).

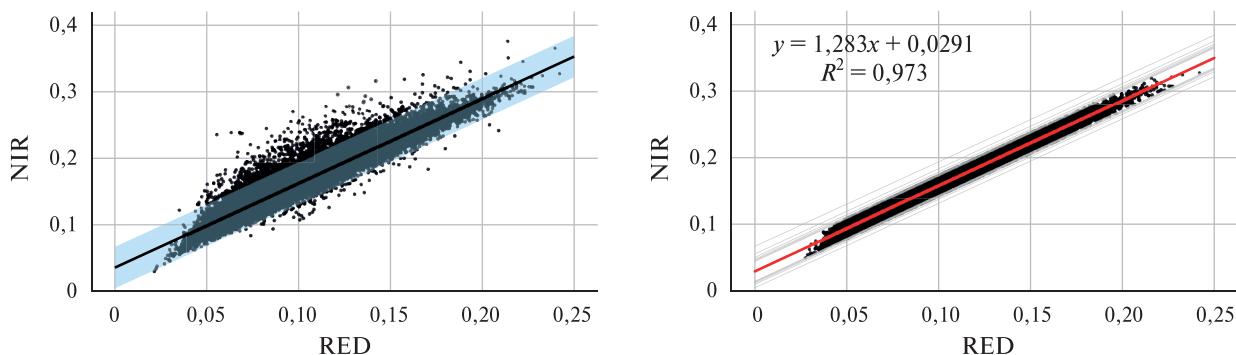


Рис. 2. Исходное облако точек открытой почвы с наложенным на него доверительным интервалом по уровню 0,95 (слева), а также финальное облако точек и проведённая через него методом наименьших квадратов линия почв (красный цвет), включая линии промежуточных доверительных интервалов (серый цвет), финальное уравнение линии почв и коэффициент детерминации R^2 (справа)

Полученное в результате описанного метода двумерное облако пар измерений в каналах RED и NIR содержало также и выбросы, которые, в силу относительно низкого разрешения VIIRS и высокой погрешности привязки исходных спутниковых продуктов V*09GA (Плотников и др., 2025а), частично соответствовали участкам естественной растительности, лесозащитным насаждениям, участкам водно-болотных угодий и другим объектам, находящимся в пределах полукилометровой зоны близости от кромки полей под чистым паром. При этом хорошо заметная вытянутость двумерного облака вдоль линии «тёмные почвы — светлые почвы» (рис. 2) для подавляющего числа точек указывает на то, что количество указанных выбросов можно считать небольшим, поэтому на финальном этапе для их фильтрации становится возможным использование итеративного процесса исключения на основе доверительных интервалов при построении линейной регрессии методом наименьших квадратов.

Процесс анализа включал в себя следующие этапы, повторяющиеся итеративно: 1) построение прямой линейной регрессии, проходящей через облако точек в пространстве измерений в красном и ближнем инфракрасном каналах VIIRS, вычисление углового и свободного коэффициента прямой линии; 2) построение для облака точек верхнего и нижнего доверительного интервала на уровне 0,95; 3) отсечение и исключение точек облака, находящихся за пределами центральной полосы внутри доверительных интервалов. Итерации повторялись до тех пор, пока относительное изменение углового и свободного коэффициента прямой между итерациями перестало превышать 1 %.

Результаты

В результате итеративного поиска было найдено финальное уравнение линии почв вида $NIR = 1,283RED + 0,0291$ с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,973$ (см. рис. 2).

Найденное уравнение линии почв было использовано для создания формулы расчёта перпендикулярного вегетационного индекса PVI по данным VIIRS Collection 2 на основе измерений в каналах VIIRS NIR и RED: $PVI = 0,614NIR - 0,788RED - 0,01789$. Это позволило сформировать новую коллекцию ежедневных продуктов PVI серии TSE по данным VIIRS, доступную пользователям Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) с помощью интерфейса систем семейства «Вега».

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 24-27-00251 (<https://rscf.ru/project/24-27-00251/>) с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Дунаева Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А. и др. Использование данных дистанционного зондирования для ранней диагностики наступления засушливых условий // Таврический вестн. аграрной науки. 2019. № 4 (20). С. 28–45. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.
2. Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е., Дунаева Е. А. Обнаружение возможности дистанционного распознавания орошаемых земель Республики Крым на основе спектрально-временных и температурных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 379–386. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-379-386.
3. Князева С. В., Никитина А. Д., Белова Е. И. и др. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне // Лесоведение. 2021. № 6. С. 645–672. DOI: 10.31857/S0024114821060073.
4. Лупян Е. А., Барталев С. А., Крашенинникова Ю. С. и др. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 272–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.
5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А., Савин И. Ю. Использование данных спутникового радиометра MODIS для распознавания пахотных земель, чистого пара и посевов озимых культур // Материалы Всероссийской науч. конф. «Методич. обеспечение мониторинга земель с.-х назначения»: сб. науч. ст. М.: РАСХН, 2010. С. 417–422.
7. Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Барталев С. А. Метод автоматического распознавания сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных и имитационной модели развития растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 131–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.
8. Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А. и др. (2020а) Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на терри-

- тории Республики Крым // Таврический вестн. аграрной науки. 2020. № 1 (21). С. 64–83. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
9. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Жуков Б. С. и др. (2020б) Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА «Метеор-М» № 2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276–282.
10. Плотников Д. Е., Бойматов Ю. Ш., Ёлкина Е. С. и др. Оценка эффективности мультисезонных моделей машинного обучения для оперативного распознавания озимых культур на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 116–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.
11. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Матвеев А. М., Прошин А. А. (2025а) К оценке точности привязки продуктов прибора VIIRS (Suomi NPP) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 2. С. 319–325. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-319-325.
12. Плотников Д. Е., Чжоу Ц., Колбудаев П. А. и др. (2025б) Разработка и оценка индекса листовой поверхности LAI растительного покрова России на основе разноугловых наблюдений КМСС (Метеор-М) и нейросетевой инверсии модели PROSAIL // Компьютер. оптика. 2025. Т. 49. № 3. С. 504–518. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
13. Плотникова А. С., Ершов Д. В., Харитонова А. О. и др. Пространственная оценка современных пожарных режимов лесных экосистем России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 228–240. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240.
14. Середа И. И., Денисов П. В., Трошко К. А. и др. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 304–310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
15. Трошко К. А., Денисов П. В., Лупян Е. А. и др. Особенности состояния зерновых культур в регионах европейской части России и Сибири в июне 2021 г. по данным дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 325–331. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331.
16. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
17. Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J. F. About the soil line concept in remote sensing // Advances in Space Research. 1993. V. 13. Iss. 5. P. 281–284. DOI: 10.1016/0273-1177(93)90560-X.
18. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A. et al. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // 8th Intern. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2022. 5 p. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.
19. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A. et al. Accuracy assessment of atmospheric correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 data over northern Eurasia // Remote sensing. 2023. V. 15. Iss. 18. Article 4395. DOI: 10.3390/rs15184395.
20. Tiruneh G. A., Meshesha D. T., Adgo E. et al. Use of soil spectral reflectance to estimate texture and fertility affected by land management practices in Ethiopian tropical highland // PLoS ONE. 2022. V. 17(7). Article e0270629. DOI: 10.1371/journal.pone.0270629.

Determination of the soil line from VIIRS data using MODIS clean fallow map and iterative regression equation search

D. E. Plotnikov¹, E. S. Elkina^{1,2}, P. A. Kolbudaev¹, M. A. Burtsev¹,
A. M. Matveev¹, A. M. Konstantinova^{1,2}

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

² Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol 295043, Russia

The paper describes new daily cloud-free Time Series Enhancement (TSE) products for the Perpendicular Vegetation Index (PVI) based on soil line equation derived from V*09GA (VNP09GA and VJ109GA) Collection 2 data acquired by the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) instruments on the NOAA and SNPP satellite platforms. A 2022 clean fallow mask, regularly updated for cropland of Russia using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, was employed to identify bare soil areas for constructing the equation. An iterative soil line equation search method was applied due to the inability to directly use the clean fallow map with VIIRS products, a consequence of the non-integer difference in spatial resolution between MODIS and VIIRS sensors, and to minimize errors in feature and brightness value co-registration caused by significant geolocation inaccuracies in the 500-meter V*09GA product. The study utilized reconstructed daily cloud-free VIIRS imagery (Historical TSE product) in the red and near-infrared (NIR) bands, along with their corresponding Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) images. The analysis involved iterative outlier filtering for the point cloud corresponding to bare soil in the VIIRS red and NIR measurement space, using 0.95 confidence intervals as the point cloud boundaries. The process included monitoring the convergence of both coefficients of the resulting regression line until the difference fell below a threshold level of 1 %. Upon convergence, the final VIIRS soil line equation was obtained from V*09GA Collection 2 data with a coefficient of determination $R^2 = 0.973$. This equation was then used in the formula to calculate the PVI from the respective VIIRS Collection 2 products.

Keywords: VIIRS, HiTSE, LOWESS, soil line, vegetation indices, iterative search, confidence intervals

Accepted: 27.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-412-418

References

1. Dunaeva Ie. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A. et al., Use of remote sensing data for early diagnostics of the dry conditions action, *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2019, No. 4 (20), pp. 28–45 (in Russian), DOI: 10.33952/2542-0720-2019-4-20-28-45.
2. Elkina E. S., Plotnikov D. E., Dunaeva E. A., Discovering the possibility for irrigated lands identification with remote sensing data over Republic of Crimea based on spectral-temporal and thermal features, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 379–386 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-379-386.
3. Knyazeva S. V., Nikitina A. D., Belova Ye. I. et al., Methods and approaches to the estimation of forest characteristics using the optical satellite data of very high spatial resolution, *Lesovedenie*, 2021, No. 6, pp. 645–672 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821060073.
4. Loupian E. A., Bartalev S. A., Krasheninnikova Yu. S. et al., Analysis of winter crops development in the southern regions of the European part of Russia in spring of 2018 with use of remote monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 2, pp. 272–276 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-272-276.
5. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
6. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Savin I. Yu., Use of data from satellite radiometer MODIS for cropland, clean fallow and winter crops mapping, *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii*

- "Metodicheskoe obespechenie monitoringa zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya" (Proc. All-Russia Scientific Conf. "Methodological Support for Monitoring Agricultural Lands"), Book of scientific papers, Moscow: RASKhN, 2010, pp. 417–422 (in Russian).
7. Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Bartalev S. A., Method for automated crop types mapping using remote sensing data and a plant growth simulation model, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 131–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-131-141.
 8. Plotnikov D. E., Elkina E. S., Dunaeva Ie. A. et al. (2020a), Development of the method for automatic winter crops mapping by means of remote sensing aimed at crops state assessment over the Republic of Crimea, *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2020, No. 1(21), pp. 64–83 (in Russian), DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
 9. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Zhukov B. S. et al. (2020b), The collection of multispectral KMSS-M (Meteor-M No. 2) satellite data aimed at quantitative assessment of the Earth surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 7, pp. 276–282 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.
 10. Plotnikov D. E., Boimatov Yu. Sh., Elkina E. S. et al., Performance assessment of multi-season machine learning models for large-scale in-season winter crops mapping, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 116–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-116-129.
 11. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Matveev A. M., Proshin A. A. (2025a), Towards assessment of georeferencing accuracy for VIIRS (Suomi NPP) products, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 2, pp. 319–325 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-319-325.
 12. Plotnikov D. E., Zhou Z., Kolbudaev P. A. et al. (2025b), Development and assessment of Leaf Area Index of Russia's vegetation cover based on multi-angular observations by KMSS (Meteor-M) and neural network inversion of PROSAIL model, *Computer optics*, 2025, V. 49, No. 3, pp. 504–518 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1621.
 13. Plotnikova A. S., Ershov D. V., Kharitonova A. O. et al., Spatial assessment of modern forest fire regimes in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 228–240 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-228-240.
 14. Sereda I. I., Denisov P. V., Troshko K. A. et al., The unique situation of winter crops development observed from remote sensing data in the European territory of Russia in October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 5, pp. 304–310 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
 15. Troshko K. A., Denisov P. V., Loupian E. A. et al., The state of grain crops in the European part of Russia and Siberia in June 2021 based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 325–331 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-325-331.
 16. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
 17. Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J. F., About the soil line concept in remote sensing, *Advances in Space Research*, 1993, V. 13, Iss. 5, P. 281–284, DOI: 10.1016/0273-1177(93)90560-X.
 18. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A. et al., Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems, *8th Intern. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, 5 p., DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.
 19. Plotnikov D., Kolbudaev P., Matveev A. et al., Accuracy assessment of atmospheric correction of KMSS-2 Meteor-M #2.2 data over northern Eurasia, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 18, Article 4395, DOI: 10.3390/rs15184395.
 20. Tiruneh G. A., Meshesha D. T., Adgo E. et al., Use of soil spectral reflectance to estimate texture and fertility affected by land management practices in Ethiopian tropical highland, *PLoS ONE*, 2022, V. 17(7), Article e0270629, DOI: 10.1371/journal.pone.0270629.