

Анализ возможности использования данных различного пространственного разрешения при проведении мониторинга объектов

А. В. Кашницкий, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, В. А. Толпин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: kashnizky@gmail.com

Проведён анализ пригодности использования данных различного пространственного разрешения при мониторинге объектов на основе осреднённых в их границах характеристик. Для этого изучалось влияние пространственного разрешения данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на средние значения вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) в границах сельскохозяйственных полей в зависимости от их площади. Использовались три набора данных, полученных на основе информации с приборов MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), КМСС (Комплекс многозональной спутниковой съёмки) и MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) с пространственным разрешением 250, 60 и 10 м/пиксель соответственно. Для каждого набора использован временной ряд восстановленных ежедневных безоблачных изображений. Взята выборка сельскохозяйственных полей в различных регионах России. Для каждого поля рассчитано среднее значение индекса NDVI по каждому набору данных и проведён корреляционный анализ значений, полученных по разным наборам. Результаты анализа при учёте всего сезона вегетации показали общую высокую согласованность: даже для полей с размером менее 10 га значение коэффициента корреляции Пирсона превысило 0,75 для пар КМСС – MSI и MODIS – MSI и 0,85 для пары MODIS – КМСС. Однако коэффициент корреляции Пирсона существенно падает при анализе данных в отдельные периоды года: в начале сезона в паре MODIS – MSI для полей площадью менее 2,5 га — до 0,45, для полей площадью от 2,5 до 5 га — до 0,58. Далее минимальное за период значение равномерно растёт с увеличением полей и при площадях свыше 15 га уже для всех недель составляет более 0,82. Таким образом, сделан вывод о том, что для полей площадью более 10–15 га ход среднего индекса NDVI имеет схожие тренды по данным с пространственным разрешением 250, 60 и 10 м/пиксель. Для полей меньшего размера присутствуют большие различия в период наименьших значений индекса NDVI, соответствующих распахке. Точный критерий пригодности данных с низким пространственным разрешением для анализа объектов определённой площади зависит от задачи и используемого периода года.

Ключевые слова: КМСС, MSI, MODIS, ДЗЗ, корреляционный анализ, влияние пространственного разрешения, ход индекса NDVI, спутниковый мониторинг, сельскохозяйственные поля

Одобрена к печати: 04.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74

Введение

При решении задач мониторинга растительности с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) часто используется анализ различных дистанционных индикаторов состояния растений в течение сезона вегетации. При этом в случае мониторинга достаточно однородных пространственных объектов, например сельскохозяйственных полей, часто используются осреднённые по всем пикселям в их границах значения. Например, в работе (Loupian et al., 2022) проводился анализ средних для поля значений индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), измеренных в течение сезона вегетации. Полученный на основе информации ДЗЗ ход вегетационного индекса по объекту применяется, в частности, при решении следующих прикладных и научных задач:

- для сравнения динамики развития одинаковых сельскохозяйственных культур на выбранном поле в различные годы или на различных полях в один год (см., например, (Denisov et al., 2021));
- для расчёта среднемноголетних норм развития конкретной сельскохозяйственной культуры и отклонения в развитии от этих норм в конкретном году (см., например, (Денисов и др., 2021));
- для детектирования произрастающей сельскохозяйственной культуры на конкретном поле или типе использования объекта (см., например, (Loupian et al., 2022)).

Использование во всех указанных задачах данных, полученных на основе приборов с разным пространственным разрешением, может влиять на вычисленные величины среднего значения вегетационного индекса на каждом поле в зависимости от его размера, площади и морфологии. Отметим также, что использование осреднённых по пикселям в границах объекта значений не ограничивается задачами в области сельского хозяйства. Аналогичные вопросы пригодности информации ДЗЗ с низким пространственным разрешением актуальны для мониторинга однородных пространственных объектов и в других областях. Например, в работе (Лупян и др., 2022) такая информация использовалась для оценки влияния на окружающую среду источников антропогенных загрязнений. Во всех подобных задачах возникает вопрос пригодности информации ДЗЗ для анализа объектов разного размера. Особенно остро вопрос стоит при мониторинге малых объектов, линейные размеры которых сравнимы или меньше, чем размеры пикселей используемых данных. Поэтому во многих случаях необходимо оценить корректность использования для изучения динамики осреднённых на объект (однородный участок) характеристик, получаемых по данным ДЗЗ различного пространственного разрешения, в том числе и сравнимого с размерами объекта. В настоящей работе предлагается подход к проведению таких оценок на примере анализа динамики значений среднего вегетационного индекса NDVI на сельскохозяйственных полях при использовании информации ДЗЗ с различным пространственным разрешением.

В статье представлены результаты анализа влияния пространственного разрешения данных ДЗЗ на получаемые значения среднего вегетационного индекса NDVI на сельскохозяйственном поле в зависимости от его площади. Для этого были взяты три набора спутниковых данных с разным пространственным разрешением. Использована достаточно представительная выборка полей из базы системы «Vega-Science» (<http://sci-vega.ru>), включающая более 20 тыс. объектов в нескольких удалённых друг от друга регионах России. Для каждого поля из выборки было рассчитано среднее значение индекса NDVI за каждую дату по каждому набору данных. Проведён корреляционный анализ полученных за одинаковый отрезок времени значений среднего индекса NDVI на поле по разным наборам данных. Анализировалось влияние площади полей на изменение коэффициента корреляции Пирсона между значениями по разным наборам данных. Кроме того, анализировались зависимости таких изменений для разных регионов, разных шагов группировки полей по площади, в различные периоды года, а также в зависимости от влияния неоднородности полей и влияния на NDVI использования данных различных приборов.

Результаты проведённого анализа, по мнению авторов, отвечают на вопрос, насколько различаются средние значения индекса в границах объекта в зависимости от соотношения его площади и пространственного разрешения используемых данных ДЗЗ, а также дают информацию о пригодности использования данных низкого пространственного разрешения при мониторинге объектов пиксельного и субпиксельного размеров.

Наборы спутниковых данных

Были взяты три набора спутниковых данных с разным пространственным разрешением. Для каждого набора данных был использован временной ряд восстановленных ежедневных безоблачных изображений вегетационного индекса NDVI, полученный на основе метода LOESS

(англ. LOcally Estimated Scatterplot Smoothing). Технология получения таких рядов опирается на весовую реализацию метода локальной взвешенной регрессии полиномами LOESS (Cleveland, 1979) для восстановления временных рядов безоблачных спутниковых наблюдений без необходимости использования масок облачности и теней. Характеристики продуктов и особенности весового подхода к восстановлению ежедневных изображений на основе LOESS были подробно описаны ранее (Plotnikov et al., 2022). А именно в настоящей работе использовались:

1. Серии восстановленных изображений низкого пространственного разрешения (250 м/пиксель), полученные на основе данных прибора MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутников Aqua и Terra (Плотников и др., 2020а).
2. Серии восстановленных изображений с пространственным разрешением 60 м/пиксель, полученные на основе прибора КМСС (Комплекс многозональной спутниковой съёмки) (камеры МСУ-201М/202М) спутника «Метеор-М» № 2 (Плотников и др., 2020б; Kolbudaev et al., 2021).
3. Серии восстановленных изображений высокого пространственного разрешения (10 м/пиксель), полученные на основе прибора MSI (англ. MultiSpectral Instrument) спутников серии Sentinel-2 (Плотников и др., 2020а; Ёлкина и др., 2019).

Для настоящей работы из архивов Центра коллективного пользования (ЦКП) ИКИ-Мониторинг (<http://ckp.geosmis.ru/>) (Лупян и др., 2019) были взяты наборы за 2020 г.

Необходимо отметить, что функции спектральной чувствительности (ФСЧ) в каналах Red (красный) и NIR (англ. near infrared, ближний инфракрасный) у разных приборов имеют различия. В связи с этим сами значения NDVI по разным наборам данных также имеют различия, не связанные с пространственным разрешением. Для демонстрации этих различий на рис. 1 приведён пример двумерной гистограммы сопоставления значений индекса NDVI за 1 июля 2020 г. из используемого набора данных по MSI и по MODIS на территорию дельты Волги.

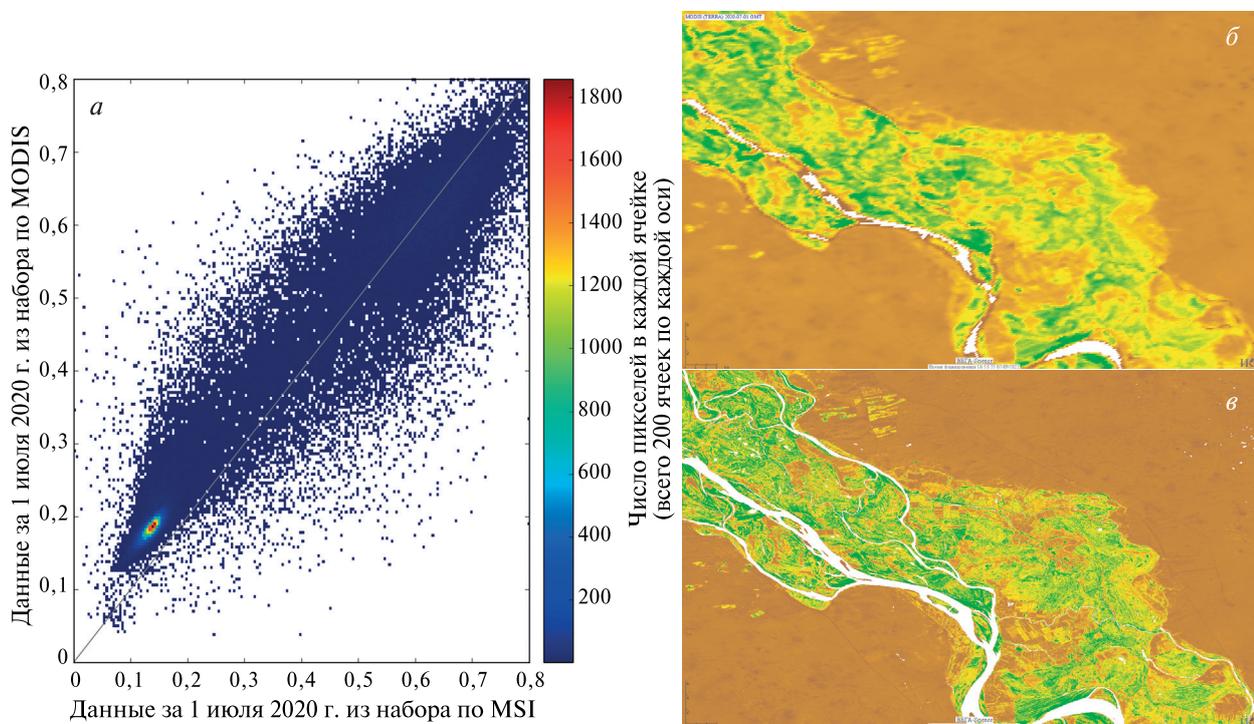


Рис. 1. К пояснению различий NDVI, полученных по MSI и MODIS. Двумерная гистограмма (а) значений индекса NDVI за одно время из используемого набора данных по MSI (ось абсцисс) и MODIS (ось ординат), а также территория, по которой получена эта гистограмма, данные из набора по MODIS (б) и MSI (в)

Поскольку большие однородные участки поверхности на *рис. 1* имеют достаточно постоянное низкое значение индекса NDVI, то различия на гистограмме не могут быть вызваны пространственным разрешением. Приведённое соотношение является характерным и прослеживается в разные моменты времени и по разным территориям. Поэтому перед проведением анализа необходимо учесть, что по данным MODIS завышены низкие значения индекса NDVI по сравнению с данными MSI, при этом более высокие значения у этой пары уже сопоставимы. Такой эффект чётко различим и при визуальном анализе изображений. Отметим, что атмосферная коррекция используемых данных КМСС основана на использовании продукта MOD09 данных MODIS (Kolbudaev et al., 2021). В связи с этим набор данных по КМСС не имеет указанных систематических различий в терминах абсолютных значений индекса NDVI с набором данных по MODIS. Для устранения возможного влияния на результаты исследования различий в значениях индекса NDVI между наборами по MSI, с одной стороны, и КМСС, MODIS — с другой, к данным по MSI была применена следующая функция:

$$\text{NDVI}_{\text{после}} = \begin{cases} \text{NDVI}_{\text{до}}, & \text{NDVI}_{\text{до}} > 0,6, \\ 0,3125\text{NDVI}_{\text{до}}^2 + 0,625\text{NDVI}_{\text{до}} + 0,11245, & \text{NDVI}_{\text{до}} \leq 0,6, \end{cases}$$

где $\text{NDVI}_{\text{после}}$ — значение индекса NDVI по MSI после коррекции; $\text{NDVI}_{\text{до}}$ — значение индекса NDVI по MSI до коррекции.

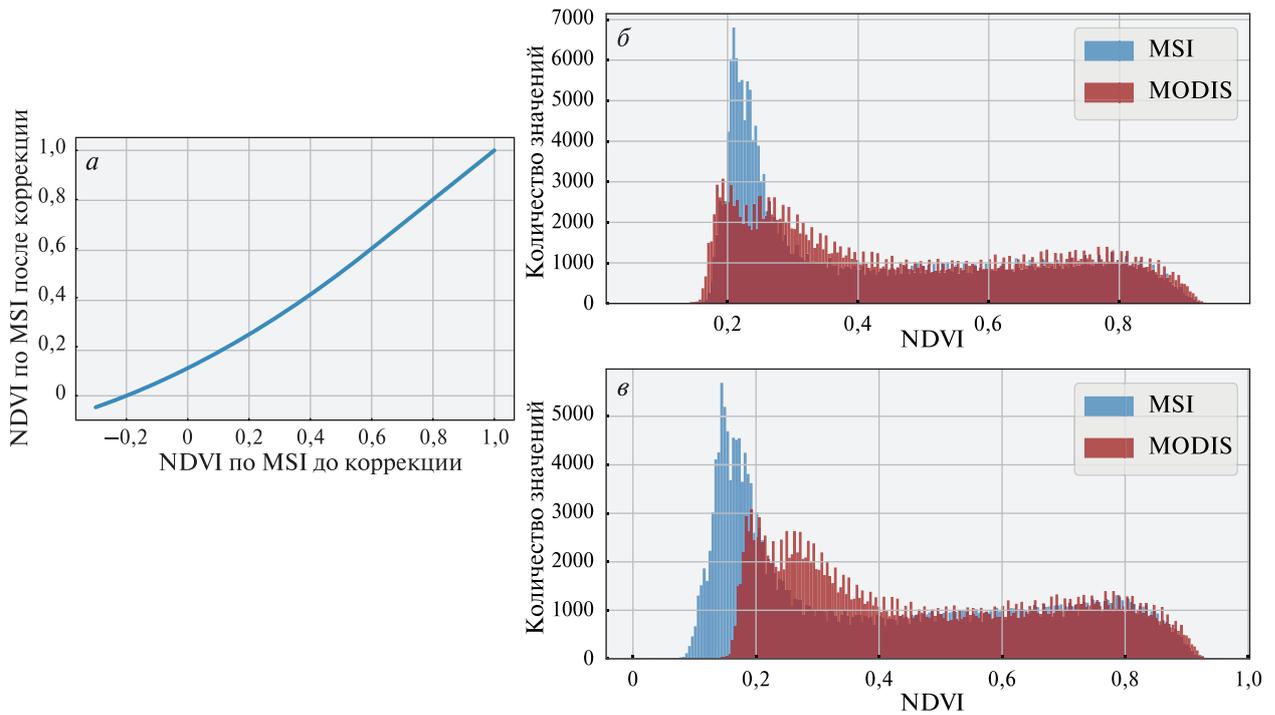


Рис. 2. Особенности приведения значений индекса NDVI по MSI к MODIS: график функции коррекции (а); гистограммы среднего значения индекса NDVI на крупных полях (площадью более 75 га) по данным MSI и MODIS до (б) и после (в) применения функции коррекции

Формула была подобрана эмпирически путём сведения гистограмм по всем исследуемым данным MSI и MODIS за период с 15-й по 35-ю неделю среднего значения индекса NDVI на крупных полях площадью более 75 га. График этой функции приведения значений индекса NDVI по MSI к MODIS показан на *рис. 2а*. Также на рисунке показан пример гистограмм среднего значения индекса NDVI на крупных полях по данным MSI и MODIS до (*рис. 2б*) и после (*рис. 2в*) применения функции. Расчёт корреляции проводился как с учётом описанной коррекции индекса NDVI по MSI к MODIS, так и без этой коррекции.

Выборка полей и метод расчёта

Из базы данных системы «Вега-Science» (Loupian et al., 2022) была взята выборка сельскохозяйственных полей в различных регионах России: в Московской, Астраханской, Ростовской, Воронежской, Тульской, Тамбовской, Волгоградской областях и в Алтайском крае. В каждой из областей выборка покрывала целиком один или несколько административных районов. Использовались все поля, на которых имелись данные за 2020 г. по всем трём наборам. Если хотя бы по одному из наборов на поле не было информации или данные включали значения «нет данных», то такое значение полностью исключалось из дальнейшего рассмотрения. Финальная выборка суммарно включала более 20 тыс. полей. В выборку вошли поля с разными типами использования и различными сельскохозяйственными культурами. Исследуемые поля достаточно полно отражают особенности хозяйствования на исследуемых территориях.

Для каждого поля было рассчитано среднее значение индекса NDVI за каждую неделю года по каждому набору данных. На *рис. 3* приведён пример всех трёх использованных наборов данных, а также поля, раскрашенные в зависимости от полученного для них значения среднего индекса NDVI.

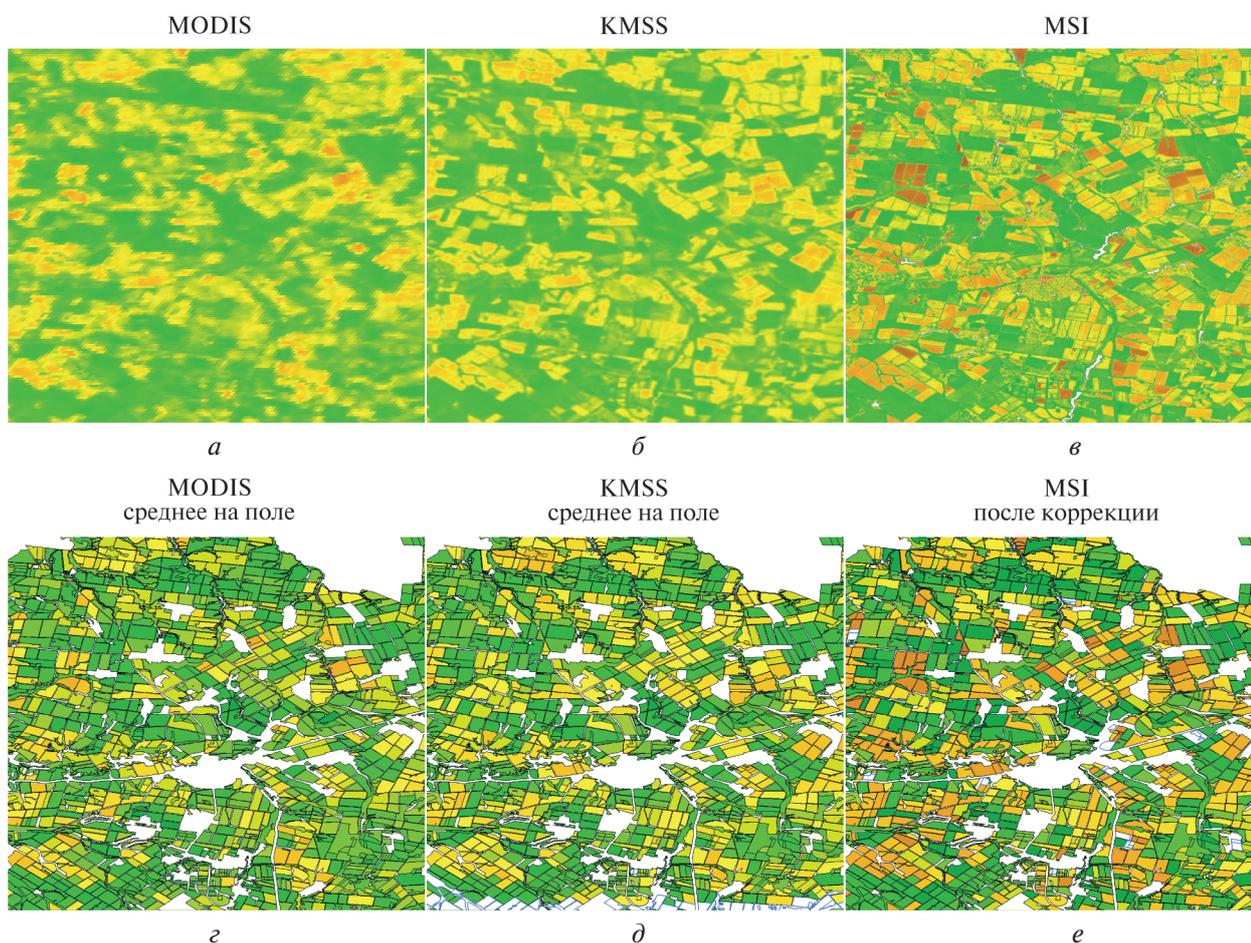


Рис. 3. Данные индекса NDVI на 3 июля 2020 г. по трём использованным наборам данных. Исходные данные по MODIS (а), KMCC (б), MSI (в). Поля по той же территории, раскрашенные в той же палитре в зависимости от полученного для них значения среднего индекса NDVI по MODIS (г), KMCC (д), MSI (е). Данные по MSI после применения функции коррекции

При расчёте среднего значения вклад каждого пикселя растровых данных при пересечении с контуром поля учитывался пропорционально площади этого пикселя. Далее был проведён корреляционный анализ полученных за одинаковый отрезок времени значений среднего индекса NDVI на поле по разным наборам. При расчёте коэффициента корреляции каждое

измерение за одну неделю считалось независимым наблюдением. В первую очередь анализировалось влияние площади полей на изменение коэффициента корреляции Пирсона между значениями по разным наборам.

Результаты и их обсуждение

Полученный график изменения коэффициента корреляции Пирсона между разными наборами в зависимости от площади полей при учёте периода с 15-й по 35-ю неделю года приведён на рис. 4. Как видно из графика, коэффициент корреляции достаточно равномерно растёт при увеличении площади полей. Для пары MODIS – KMCC он превышает 0,9 даже для малых полей, что связано с уже отмеченной особенностью получения набора данных по KMCC. Для пар MSI – MODIS и MSI – KMCC получились достаточно высокие (около 0,8) значения даже для малых полей площадью менее 10 га. При увеличении площади полей коэффициент корреляции превышает 0,9 для пары MSI – MODIS уже на размерах более 22 га, а для пары MSI – KMCC — на размерах более 55 га. Полученная высокая корреляция представляется значимой с учётом большого числа измерений.

Различия коэффициента корреляции в группах полей с большой площадью (при одинаковом старте в группах полей с маленькой площадью) для пары MSI – KMCC по сравнению с парой MSI – MODIS авторы объясняют более низким реальным временным разрешением данных KMCC. Этот факт привёл к сильным различиям в начале сезона, когда сельскохозяйственная растительность быстро развивается. Для изучения этого эффекта были выполнены дополнительные исследования влияния на корреляции периода наблюдений, которые будут приведены далее.

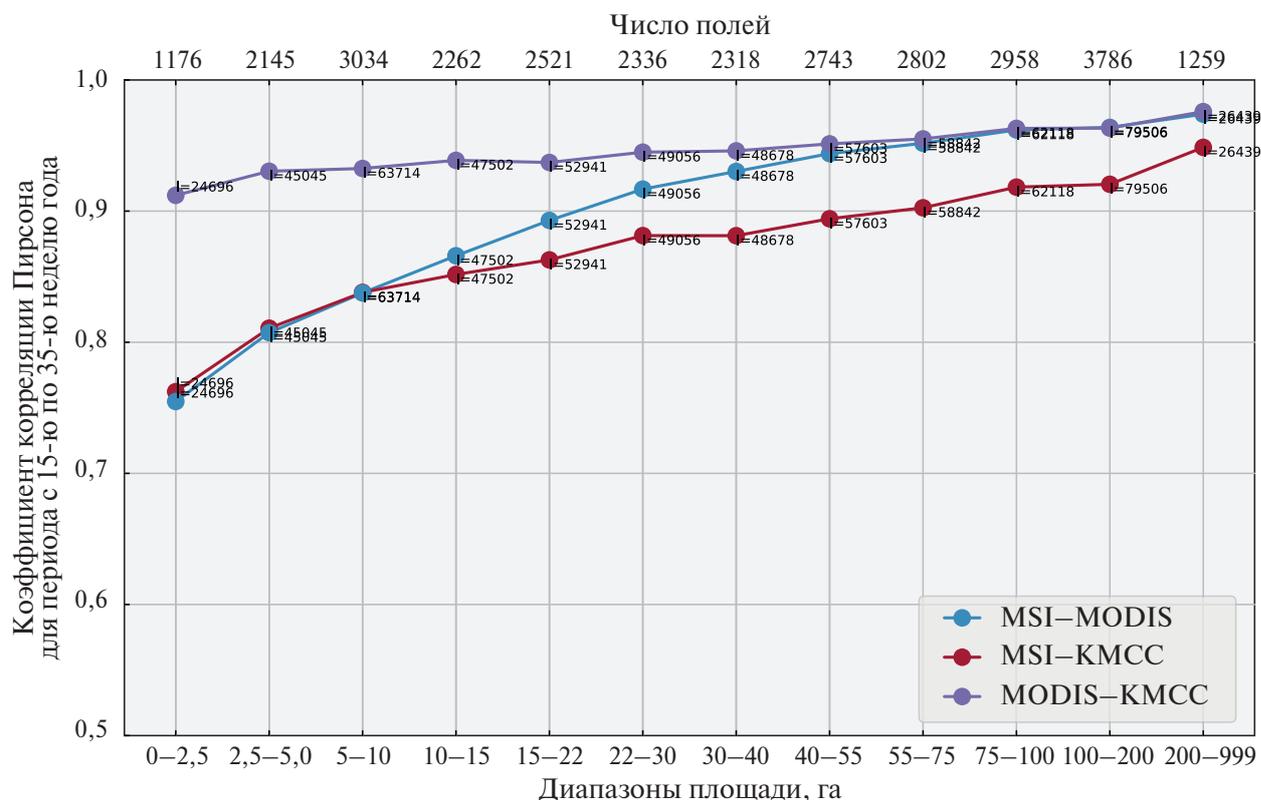


Рис. 4. Графики изменения коэффициента корреляции Пирсона между разными наборами в зависимости от площади полей; получены по выборке полей в разных регионах с учётом периода с 15-й по 35-ю неделю года. По оси ординат — коэффициент корреляции Пирсона. По оси абсцисс снизу — диапазоны площади полей; по оси абсцисс сверху приведено суммарное число полей такой площади, участвовавших в расчёте. Рядом с каждой точкой указано участвовавшее в расчёте число независимых измерений по всем неделям и всем полям диапазона

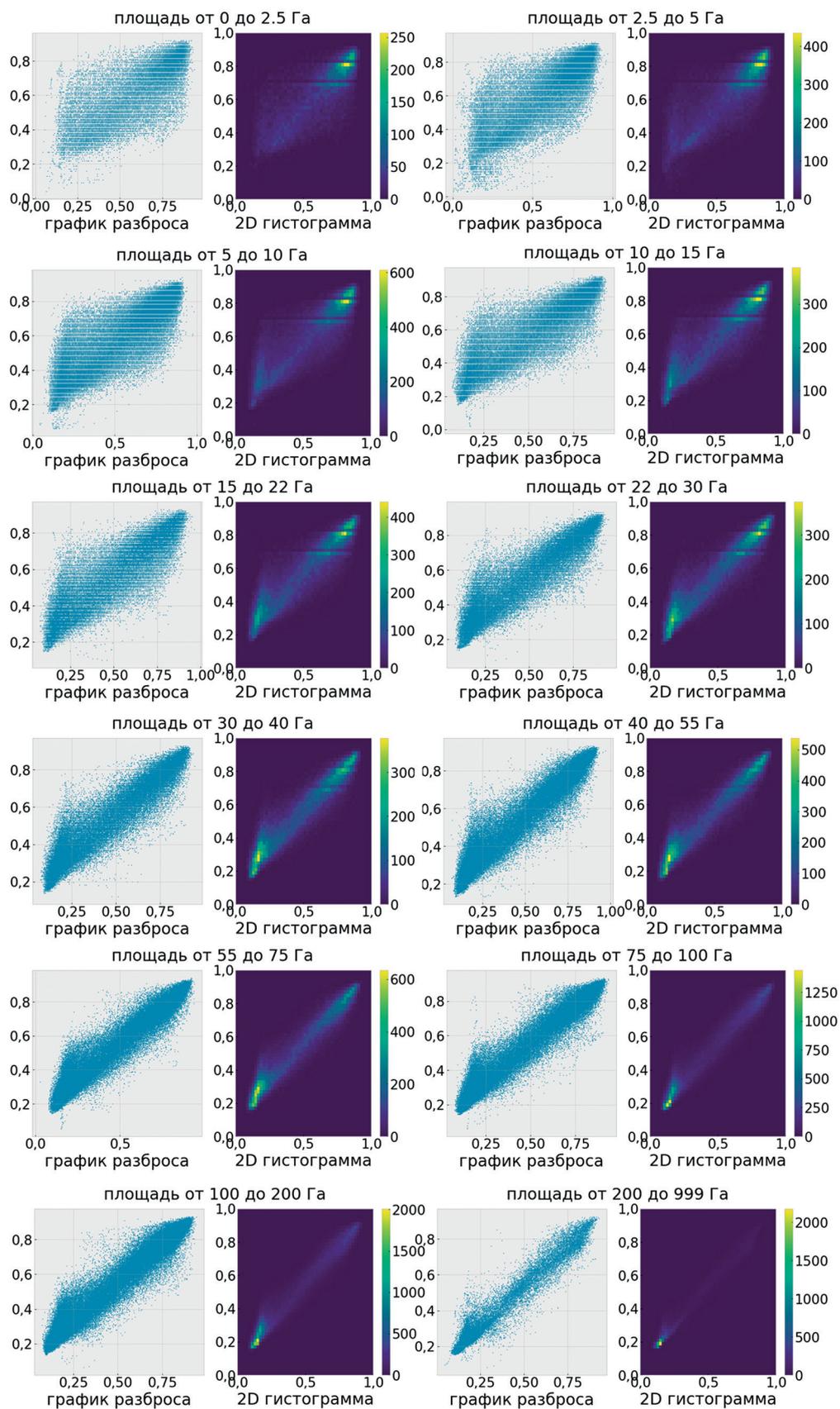


Рис. 5. Графики разброса (слева) и двумерные гистограммы (справа) средних значений индекса NDVI в паре MSI – MODIS по каждому диапазону площадей, от малых (площадью менее 2,5 га) до крупных (площадью более 200 га). По оси абсцисс — данные набора по прибору MSI, по оси ординат — данные набора по прибору MODIS

Для каждого диапазона площадей на *рис. 5* (см. с. 66) построены графики разброса и двумерные гистограммы средних значений индекса NDVI в паре MSI–MODIS. Данные на *рис. 5* приведены для той же выборки, что и на *рис. 4* (те же диапазоны площади по полям в разных регионах с учётом периода с 15-й по 35-ю неделю года). Из рисунка видно, что разброс равномерно уменьшается и при увеличении площади полей становится всё более близким к прямой. Отдельные выбивающиеся значения, которых становится тем меньше, чем крупнее поля, можно связать с влиянием пикселей на границе полей. По данным низкого пространственного разрешения пограничные пиксели несут в себе информацию от поверхности вне границ поля, что может приводить к искажению среднего значения на поле. Для данных более высокого пространственного разрешения такой эффект менее выражен. При этом в случае, если поле окружено объектами с аналогичным значением индекса (например, другими полями с той же культурой и типом использования), такое влияние также будет отсутствовать. С увеличением площади полей количество пограничных пикселей становится всё меньше в процентном соотношении, и, как следствие, их влияние на искажение среднего значения уменьшается.

На двумерных гистограммах для малых полей явно прослеживается дополнительное облако значений с низкими величинами среднего NDVI по данным MSI, имеющих по данным MODIS более высокие значения. Авторы связывают его с малыми полями с низким значением NDVI, окружёнными территорией с высокими величинами NDVI. Например, такая ситуация характерна для малых распаханых полей, окружённых зелёной растительностью. Такие поля плохо различимы на данных MODIS из-за пространственного разрешения.

Описанные особенности сохраняются при дополнительном исследовании влияния различных факторов. Например, при ином разбиении полей на группы по площади общая тенденция и диапазон значений коэффициента корреляции Пирсона не изменились. При сравнении данных в разных регионах абсолютные значения коэффициента корреляции Пирсона менялись в пределах 0,05, но общая тенденция и диапазон остались аналогичными. Приведём далее основные дополнительно проведённые исследования влияния разных факторов на результаты.

Исключение неоднородных полей

Однородность полей учитывалась по данным MSI с пространственным разрешением 10 м/пиксель. Для каждого поля за каждую неделю был рассчитан коэффициент вариации (как отношение стандартного отклонения к среднему значению на поле). Далее был вычислен средний коэффициент вариации за все учитываемые (с 15-й по 35-ю) недели года и построено распределение полученного среднего за год коэффициента вариации по каждому полю. В качестве примера на *рис. 6* приведено распределение полученного коэффициента для выборки по Воронежской обл.

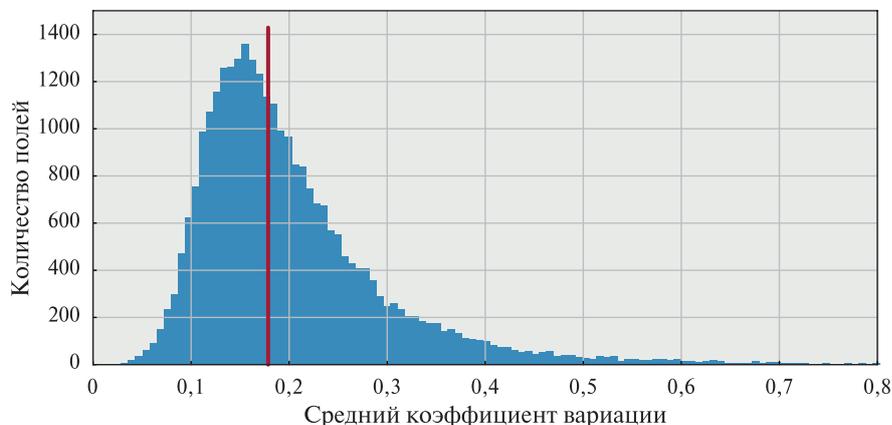


Рис. 6. Распределение количества полей в зависимости от среднего за год коэффициента вариации для выборки по Воронежской обл.

Неоднородными считались 50 % полей, у которых полученный средний коэффициент вариации за все учитываемые недели года был меньше, чем у других 50 % (на рисунке отделены красной линией). Дополнительно приведённое распределение указывает на то, что большинство исследуемых полей имеют достаточно хороший контур и однородны внутри имеющихся в базе данных границ.

Исключение неоднородных полей практически не изменило значения коэффициента корреляции Пирсона, во всех группах изменения не превышают 0,03. А именно во всех парах данных и группах площадей наблюдается незначительное (от 0,01 до 0,03) увеличение коэффициента корреляции Пирсона для однородных полей по сравнению с неоднородными. Основным эффектом такого исключения неоднородных полей выступает сглаживание графиков роста коэффициента корреляции при увеличении площади.

Влияние коррекции значений индекса NDVI между наборами

Описанная в разд. «Наборы спутниковых данных» коррекция на различия в индексе NDVI по разным данным не изменила значения коэффициента корреляции Пирсона во всех парах и группах площадей. Это объясняется тем, что коэффициент корреляции показывает не различия абсолютных значений, а именно взаимосвязь изменений, т. е. связь хода среднего индекса NDVI на поле по разным наборам данных.

Влияние учёта различных периодов года

Наибольшее влияние на графики изменения коэффициента корреляции Пирсона между разными наборами оказывает учёт иного периода года. Влияние различных диапазонов года исследовалось рассмотрением значений только в отдельные периоды года. Базовым сценарием считался период с 15-й по 35-ю неделю года. Этот диапазон для большинства исследуемых полей соответствует периоду вегетации. Однако так как длина периода вегетации и ход индекса NDVI на полях в различных регионах и с различными видами сельскохозяйственных культур сильно различаются, то дополнительно было оценено, как меняется коэффициент корреляции Пирсона при изменении этого диапазона во все стороны. На *рис. 7* (см. с. 69) представлены примеры полученных графиков изменения коэффициента корреляции между разными наборами с учётом периодов с 10-й по 15-ю неделю года (см. *рис. 7а*), с 15-й по 20-ю (см. *рис. 7б*), с 20-й по 25-ю (см. *рис. 7в*), с 25-й по 30-ю (см. *рис. 7е*), с 30-й по 35-ю (см. *рис. 7д*), с 35-й по 40-ю неделю года (см. *рис. 7е*). Основным результатом анализа влияния учёта разных периодов года становится тот факт, что, несмотря на высокую корреляцию для всех групп площадей при учёте всего сезона вегетации, в отдельные периоды года корреляция падает для полей малого размера. Например, для периода с 10-й по 15-ю неделю на *рис. 7а* в паре MSI – MODIS для группы полей с площадью менее 2,5 га коэффициент корреляции составил чуть более 0,5, а для группы 2,5–5 га равен 0,65. Такое снижение корреляции для тех же групп полей по сравнению с другими периодами объясняется тем, что в начале года происходит разрозненная распашка мелких полей, которые на данных MODIS неразличимы. Однако при изучении всего сезона вегетации в анализ попадают и более поздние даты, когда значения внутри поля сравнимы с окружением, что приводит к сопоставимым значениям между наборами с разным пространственным разрешением. Как следствие, при анализе всего периода вегетации получают высокие значения корреляции даже для полей с маленькой площадью. Однако из этого нельзя сделать вывод о пригодности данных низкого пространственного разрешения для анализа полей с маленькой площадью, ведь при этом могут быть пропущены все ключевые особенности поведения объекта, проявляющиеся только в отдельные периоды.

Чтобы на одинаковых основаниях оценить корреляцию в каждой группе площадей от периода наблюдения, были построены зависимости, приведённые на *рис. 8* (см. с. 70). На графиках независимо для каждой недели года построена зависимость коэффициента

корреляции Пирсона для каждой группы площадей поля. При расчёте каждой точки отбирались только значения в определённую неделю года и только для одной группы полей: на *рис. 8а* — для пары MODIS–MSI, на *рис. 8б* — для пары KMCC–MSI, на *рис. 8в* — для пары KMCC–MSI. По оси ординат — коэффициент корреляции Пирсона, по оси абсцисс — недели года.

Как видно из графиков на *рис. 8*, для полей с небольшой площадью корреляция в начале и конце сезона существенно ниже, чем в середине. Это объясняется уже отмеченной особенностью для таких полей сопоставления значений внутри и вне контура. Из графиков на *рис. 8* можно сделать основные выводы исследования о пригодности использования наборов данных с разным пространственным разрешением при мониторинге объектов. Точный критерий пригодности данных с низким пространственным разрешением для анализа объекта конкретной площади зависит от задачи. Однако если принимать данные из набора по MSI как эталон, то можно ориентироваться на значения, приведённые на *рис. 8* и в *таблице*.

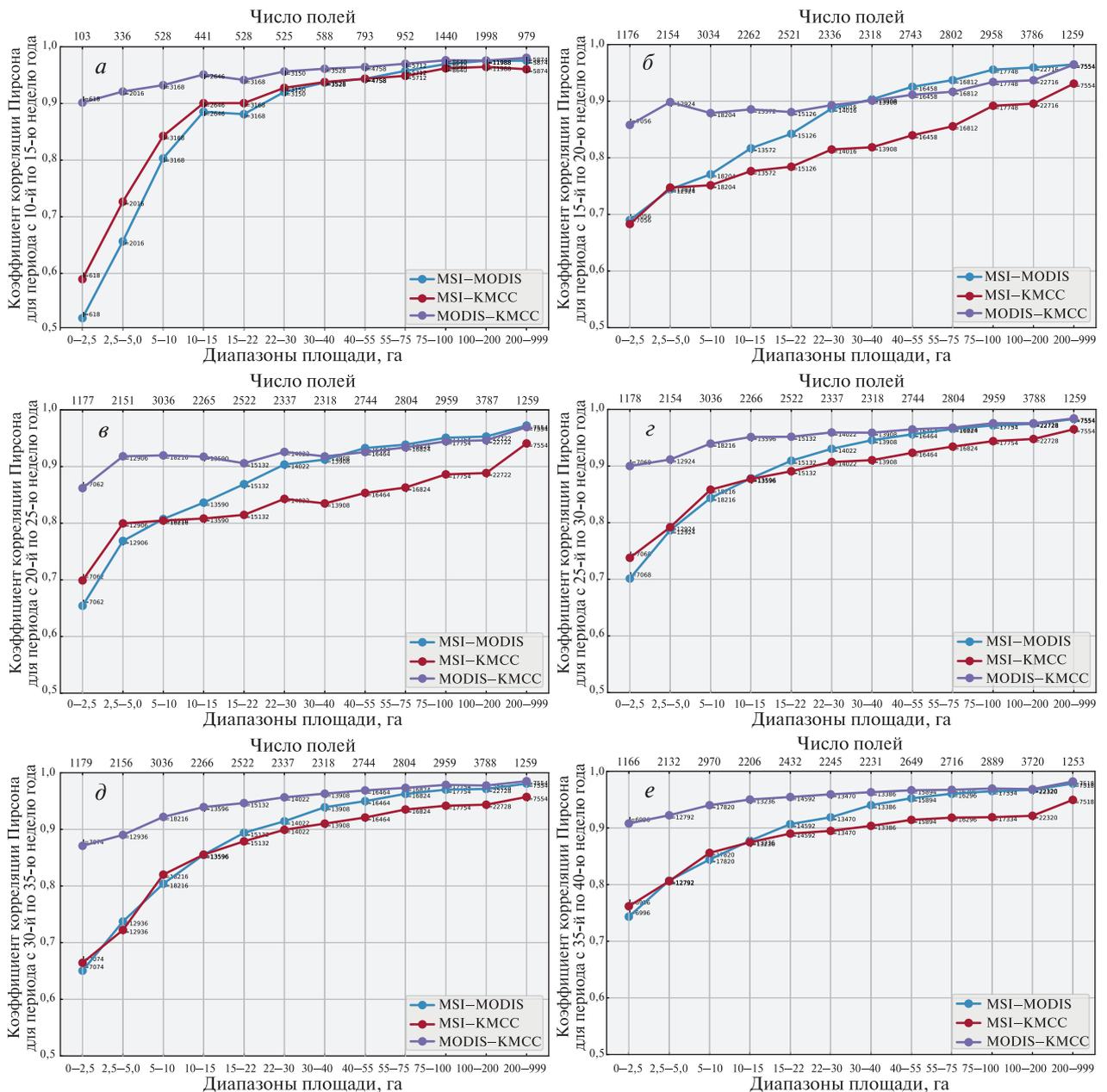


Рис. 7. Графики изменения коэффициента корреляции Пирсона между разными наборами в зависимости от площади полей, полученные по выборке полей в разных регионах. Подписи аналогичны *рис. 4*

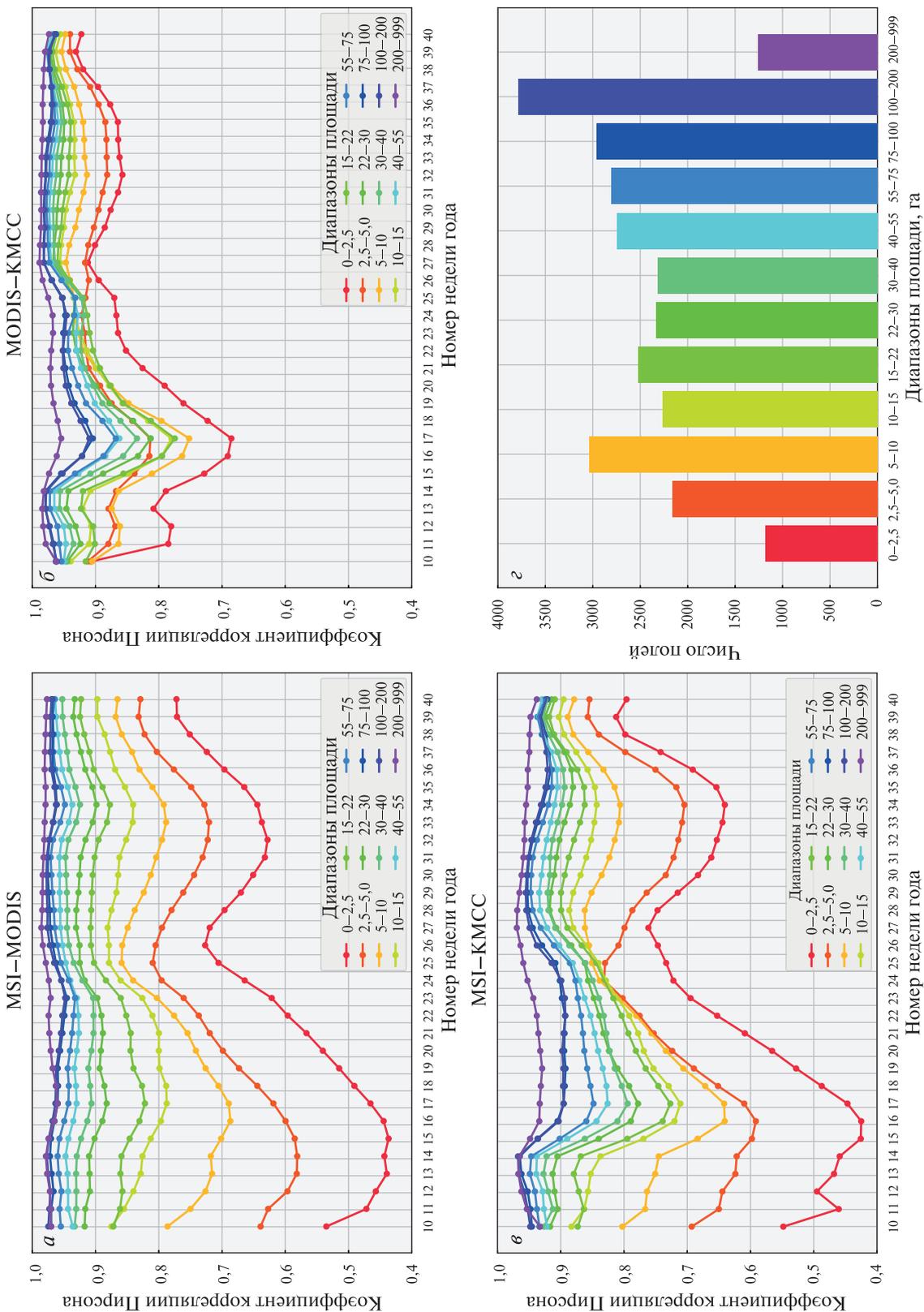


Рис. 8. Изменение коэффициента корреляции Пирсона в парах MSI – MODIS (а), MODIS – KMCC (б), MSI – KMCC (в) независимо в каждую неделю года для каждой группы площади полей. Линии разного цвета соответствуют указанным в легенде диапазонам площади. Гистограмма количества полей в каждом диапазоне (г)

Коэффициент корреляции Пирсона в парах MSI – MODIS и MSI – KMCC в зависимости от площади полей

Коэффициент корреляции Пирсона	Пары	Площадь полей, га											
		0–2,5	2,5–5,0	5–10	10–15	15–22	22–30	30–40	40–55	55–75	75–100	100–200	200–999
Минимальный за период вегетации	MSI – MODIS	0,43	0,58	0,68	0,78	0,82	0,88	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95
	MSI – KMCC	0,42	0,59	0,64	0,71	0,72	0,77	0,79	0,82	0,84	0,89	0,89	0,92
Средний за период с 15-й по 35-ю неделю	MSI – MODIS	0,75	0,80	0,83	0,86	0,89	0,91	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97
	MSI – KMCC	0,76	0,81	0,83	0,85	0,86	0,88	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,94
Средний за период с 10-й по 40-ю неделю	MSI – MODIS	0,61	0,70	0,82	0,87	0,88	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97
	MSI – KMCC	0,66	0,69	0,82	0,87	0,87	0,90	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,95

Также отметим, что число полей с размером менее 10 га (все случаи, где минимальный за период вегетации коэффициент корреляции Пирсона менее 0,79) в выборке составляет всего 27 % от общего числа (см. рис. 8г). Говоря об аналогичных показателях для набора данных по прибору KMCC, отметим сопоставимые цифры. Отсутствие у данных из набора по KMCC ожидаемых улучшений по сравнению с набором по MODIS связано с особенностями его формирования. В частности, набор данных KMCC за 2020 г. был построен на основе данных прибора только на аппарате «Метеор-М» № 2, поскольку подготовленные данные с аппарата «Метеор-М» № 2-2 не были доступны на момент формирования анализируемых ежедневных восстановленных изображений. Это, по мнению авторов, снизило реальное временное разрешение данных, что сказалось в моменты относительно быстрых изменений сельскохозяйственной растительности в весенний период наблюдений. Дополнительным доказательством этого факта служит сильное снижение и колебания значений корреляции для пары KMCC – MSI в начале сезона. Таким образом, можно заключить, что при анализе на основе средних по объекту значений временное разрешение наблюдений так же важно, как и пространственное разрешение.

Заключение

При учёте ряда данных за весь сезон вегетации результаты корреляционного анализа показали общую высокую согласованность среднего значения индекса NDVI на поле по всем использованным наборам данных. Даже для малых полей с размером менее 10 га значение коэффициента корреляции Пирсона превысило 0,75 для пар KMCC – MSI и MODIS – MSI и 0,85 для пары MODIS – KMCC. При этом с увеличением размера полей коэффициент корреляции достаточно равномерно рос до значений выше 0,95 на полях с размером более 100 га. Полученные значения практически не зависят от региона исследования, шага группировки по площади, учёта однородности полей, коррекции абсолютных значений между наборами. Однако корреляция существенно падает при анализе данных в отдельные периоды года. В паре MODIS – MSI в отдельные периоды года коэффициент корреляции Пирсона падает для полей площадью менее 2,5 га до 0,45, для полей от 2,5 до 5 га — до 0,58, для полей от 5 до 10 га — до 0,68, для полей от 10 до 15 га — до 0,79, а при площадях более 15 га уже для всех недель он выше 0,82. Использование набора данных по прибору KMCC даёт аналогичные показатели. Отсутствие у данных из набора по KMCC ожидаемых улучшений по сравнению с набором по MODIS связано в первую очередь с весенним периодом, когда его более низкое временное разрешение не позволяет зафиксировать быстро происходящие изменения. Таким образом, можно заключить, что при анализе на основе средних по объекту значений временное разрешение наблюдений так же важно, как и пространственное разрешение.

Полученные значения коэффициента корреляции указывают, что для полей более 10–15 га ход среднего индекса NDVI имеет схожие тренды по данным с пространственным разрешением 250, 60 и 10 м/пиксель, хотя они могут и различаться в абсолютных значениях. Для полей размера 5–10 га соответствие уже значительно хуже. Для полей менее 5 га присутствуют большие различия в период наименьших значений индекса NDVI, соответствующих распахке. Точный критерий пригодности данных с низким пространственным разрешением для анализа объектов определённой площади с помощью осреднённых в их границах значений зависит от задачи и используемого для анализа периода года. При этом авторы предлагают ориентироваться на значения корреляции, приведённые на *рис. 8* и в *таблице* статьи.

Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019) и Объединённой системы работы с данными центров НИЦ «Планета» (Бурцев и др., 2019). Работа реализована в рамках темы «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8.

Литература

1. Бурцев М. А., Успенский С. А., Крамарева Л. С., Антонов В. Н., Калашиников А. В., Балашов И. В., Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Матвеев А. М., Прошин А. А. Современные возможности и перспективы развития Объединённой системы распределённой работы с данными НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 198–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.
2. Денисов П. В., Серeda И. И., Трошко К. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Толпин В. А. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171–185. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
3. Ёлкина Е. С., Егоров В. А., Плотников Д. Е., Самофал Е. В., Барталев С. А., Патил В. К., Сунил Д. К., Чаван В. К. Развитие методов спутникового мониторинга состояния посевов сахарного тростника в Южной Индии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 159–173. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-159-173.
4. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Кашицкий А. В., Балашов И. В., Барталев С. А., Константинова А. М., Кобец Д. А., Мазуров А. А., Марченков В. В., Матвеев А. М., Радченко М. В., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. 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.
5. Лупян Е. А., Константинова А. М., Кашицкий А. В., Ермаков Д. М., Саворский В. П., Панова О. Ю., Бриль А. А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для оценки их влияния на окружающую среду // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193–213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213.
6. Плотников Д. Е., Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А., Хвостиков С. А., Лупян Е. А., Барталев С. А. (2020а) Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории Республики Крым // Таврический вестн. аграр. науки. 2020. № 1(21). С. 64–83. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83.
7. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Жуков Б. С., Матвеев А. М., Барталев С. А., Егоров В. А., Кашицкий А. В., Прошин А. А. (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.
8. Cleveland W. S. Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots // J. American Statistical Association. 1979. V. 74. Art. No. 368. P. 829–836. DOI: 10.2307/2286407.
9. Denisov P. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Sereda I. I., Tolpin V. A., Troshko K. A. Possibilities of Vega satellite monitoring services for arable land use assessment on the example of Smolensk region // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 723. Art. No. 032072. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032072.

10. Kolbudaev P. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A., Proshin A. A., Matveev A. M. The methods and automatic technology aimed at imagery georeferencing, cloud screening, atmospheric and radiometric correction of KMSS-M satellite data // E3S Web Conf. 2021. V. 333. Art. No. 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133301006>.
11. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
12. Plotnikov D. E., Loupian E. A., Kolbudaev P. A., Proshin A. A., Matveev A. M. Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems // 8th Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.

Analysis of the possibility of using different spatial resolution data for objects monitoring

A. V. Kashnitskii, E. A. Loupian, D. E. Plotnikov, V. A. Tolpin

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: kashnizky@gmail.com*

The paper analyzes the suitability of using low spatial resolution data when monitoring objects on the basis of characteristics averaged within their boundaries. For this purpose the influence of spatial resolution of remote sensing data on the average values of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) within the boundaries of agricultural fields depending on their area was studied. Three datasets derived from information from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), KMSS (Satellite Multiband Imaging System), and MSI (MultiSpectral Instrument) instruments with spatial resolutions of 250, 60, and 10 m/pixel, respectively, were used. A time series of reconstructed daily cloudless images was used for each set. A sample of agricultural fields in different regions of Russia was taken. For each field, the average NDVI value for each data set was calculated and a correlation analysis of the values obtained from different data sets was carried out. The results of the analysis, when considering the whole growing season, showed general high consistency: even for fields of less than 10 ha the Pearson correlation coefficient values exceeded 0.75 for KMSS–MSI and MODIS–MSI pairs and 0.85 for MODIS–KMSS pair. However, the Pearson correlation coefficient drops significantly when analyzing data at certain periods of the year: at the beginning of the season in the MODIS–MSI pair for fields smaller than 2.5 ha to 0.45, for fields from 2.5 to 5 ha to 0.58. Further, the minimal value for the period increases uniformly with the increase of the fields and at the area of more than 15 ha for all weeks makes more than 0.82. Thus, it was concluded that for fields of more than 10–15 ha the course of average NDVI has similar trends, according to the data with spatial resolution of 250, 60 and 10 m/pixel. For smaller fields, there are large differences in the period of lowest NDVI values corresponding to plowing. The exact criterion for the suitability of low spatial resolution data for the analysis of objects of a certain area depends on the task and the period of the year.

Keywords: KMSS, MSI, MODIS, remote sensing, correlation analysis, spatial resolution effects, NDVI index progress, satellite monitoring, agricultural fields

Accepted: 04.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-60-74

References

1. Burtsev M. A., Uspenskiy S. A., Kramareva L. S., Antonov V. N., Kalashnikov A. V., Balashov I. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Actual features and evolution prospects of the SRC “Planeta” distributed data operation united system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 198–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-198-212.

2. Denisov P. V., Sereda I. I., Troshko K. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Opportunities and experience of operational remote monitoring of winter crops condition in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 171–185 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-171-185.
3. Elkina E. S., Egorov V. A., Plotnikov D. E., Samofal E. V., Bartalev S. A., Patil V. C., Sunil J. K., Chavan V. S., Development of satellite monitoring methods for sugarcane crop condition assessment in Peninsular India, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 159–173 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-159-173.
4. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Mazurov A. A., Marchenko V. V., Matveev A. M., Radchenko M. V., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., 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, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
5. Loupian E. A., Konstantinova A. M., Kashnitskii A. V., Ermakov D. M., Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Bril A. A., The possibilities of organizing long-term remote monitoring of large sources of anthropogenic pollution to assess their impact on the environment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 193–213 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213.
6. Plotnikov D. E., Elkina E. S., Dunaieva E. A., Khvosikov S. A., Loupian E. A., Bartalev S. A. (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.
7. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Zhukov B. S., Matveev A. M., Bartalev S. A., Egorov V. A., Kashnitskii A. V., Proshin A. A. (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, Vol. 7, No. 7, pp. 276–282 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.
8. Cleveland W. S., Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots, *J. American Statistical Association*, 1979, Vol. 74, Art. No. 368, pp. 829–836, DOI: 10.2307/2286407.
9. Denisov P. V., Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Sereda I. I., Tolpin V. A., Troshko K. A., Possibilities of Vega satellite monitoring services for arable land use assessment on the example of Smolensk region, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 723, Art. No. 032072, DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032072.
10. Kolbudaev P. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A., Proshin A. A., Matveev A. M., The methods and automatic technology aimed at imagery georeferencing, cloud screening, atmospheric and radiometric correction of KMSS-M satellite data, *E3S Web Conf.*, 2021, Vol. 333, Art. No. 01006, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133301006>.
11. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
12. Plotnikov D. E., Loupian E. A., Kolbudaev P. A., Proshin A. A., Matveev A. M., Daily surface reflectance reconstruction using LOWESS on the example of various satellite systems, *VIII Intern. Conf. Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, 2022, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848630.