

УДК 551.589.6

Оценка конвективной неустойчивости атмосферы в случаях со шквалами, смерчами и крупным градом по данным спутниковых наблюдений и реанализа ERA5

А.Н. Шихов^{✉ 1,2}, А.В. Чернокульский^{2,3}, А.А. Спрыгин^{2,4}, Ю.И. Ярынич^{2,5*}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

³Институт географии РАН
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

⁴ФГБУ НПО «Тайфун»
249038, г. Обнинск, Калужской обл., ул. Победы, 4

⁵Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, стр. 1

Поступила в редакцию 22.03.2022 г.;
после доработки 7.04.2022 г.;
принята к печати 11.04.2022 г.

Рассмотрена применимость спутниковых данных для оценки неустойчивости и влагосодержания атмосферы в случаях возникновения конвективных опасных явлений погоды на европейской территории России и Урале. Рассматриваемая выборка включала 305 случаев шквалов, смерчей и крупного града. Оценены значения параметра неустойчивости Lifted Index и общего влагосодержания воздуха по спутниковым данным MODIS Atmospheric Profile Product и данными реанализа ERA5. Установлено, что медианные значения параметров неустойчивости и влагосодержания по разным данным близки, а экстремумы существенно различаются. По данным MODIS фиксируются локальные области с очень сильной неустойчивостью и высоким влагосодержанием, которые не обнаруживаются по данным реанализа. Отмечена существенная ограниченность данных MODIS в связи с низкой частотой съемки и невозможностью получения информации о параметрах неустойчивости для ячеек с облачностью, что, в частности, сократило итоговую выборку с 305 до 95 случаев

Ключевые слова: конвективные опасные явления погоды, шквал, смерчи, спутниковые данные MODIS, конвективная неустойчивость, влагосодержание атмосферы, реанализ ERA5; convective hazardous weather event, squall, tornadoe, MODIS satellite data, convective instability, precipitable water vapor, ERA5 reanalysis.

Введение

Конвективные опасные явления погоды (КОЯП) — шквалы, смерчи, крупный град и сильные ливни — характеризуются достаточно быстрым развитием, а их прогнозы — низкой заблаговременностью и недостаточной точностью. Для диагностики и прогнозирования условий, благоприятных для возникновения КОЯП, широко применяется ингредиентный подход, в рамках которого развитие глубокой конвекции в атмосфере рассматривается как функция нескольких предикторов (ингреди-

ентов). Как правило, выделяют четыре основных ингредиента: аномально теплый и влажный воздух в приземном слое, восходящие движения у поверхности, связанные чаще всего с фронтальным разделом или орографией, неустойчивая стратификация (плавучесть) атмосферы и вертикальный сдвиг ветра [1–3]. На интенсивность КОЯП могут влиять и другие факторы, например аэрозольный состав атмосферы [4, 5].

Для количественной оценки основных ингредиентов или их сочетаний чаще всего используется ряд диагностических переменных, так называемых индексов неустойчивости. В качестве исходной информации для расчета индексов служат вертикальные профили температуры и влажности воздуха, полученные на основе аэрологического зондирования атмосферы [1, 6, 7], систем реанализа [8, 9] или сочетания этих источников [10, 11].

* Андрей Николаевич Шихов (shikhovan@gmail.com); Александр Владимирович Чернокульский (a.chernokulsky@ifaran.ru); Александр Анатольевич Спрыгин (spralexandr@gmail.com); Юлия Ивановна Ярынич (julia.yarinich@yandex.ru).

Данные спутникового мониторинга наиболее часто применяются для идентификации мезомасштабных конвективных систем, вызывающих опасные явления, определения их характеристик (температуры верхней границы облаков и др.), а также нахождения различных сигнатур интенсивных восходящих потоков на верхней границе облаков [12–14]. Также спутниковые данные позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности воздуха, а значит, могут быть использованы для расчета индексов неустойчивости [15]. Продуктом такого рода является MOD/MYD07_L2 (Atmospheric Profile Product), получаемый по данным спектрорадиометра MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua [16]. Он содержит профили температуры и влажности воздуха, восстановленные по 20 изобарическим поверхностям (от 5 до 1000 гПа), а также расчетные значения общего влагосодержания в столбе атмосферы (Total Column Precipitable Water Vapor, PW) и нескольких индексов неустойчивости – Total Totals (TT), K Index (K) и Lifted Index (LI).

Данные MOD/MYD07_L2 ранее использовались для диагностики условий развития конвекции на территории Западной Сибири [17–19]. При их сопоставлении с данными аэрологического зондирования была выявлена статистически значимая корреляция для индексов K и LI и отсутствие таковой – для индекса TT. Для влагосодержания (PW) аналогичное сравнение не проводилось. Профили температуры и влажности, полученные по данным MODIS, применялись также для усвоения в моделях численного прогноза погоды (МЧПП). В частности, оценивалось влияние такого усвоения на достоверность прогноза конвективных явлений в тропической зоне [20, 21].

Основное преимущество продукта MODIS Atmospheric Profile – высокое пространственное разрешение (5 км), значительно выше, чем у современных систем реанализа и глобальных МЧПП. Однако его практическое применение существенно ограничивается низким временным разрешением (не более 4–6 раз в сутки, что соответствует повторяемости съемки со спутников Terra и Aqua) и невозможностью получения вертикальных профилей температуры и влажности для ячеек с облачностью [16]. Кроме того, данные MODIS позволяют оценить сочетание лишь двух ингредиентов – плавучести и температуры и влажности приземного воздуха. Другие ингредиенты необходимо дополнительно оценивать по данным аэрологического зондирования, реанализа или МЧПП. Тем не менее применение данных MOD/MYD07_L2 может представлять интерес для выявления мезомасштабных особенностей развития конвекции. Верификация индексов, полученных по данным MODIS, может быть выполнена по данным реанализа нового поколения ERA5 с высоким пространственным разрешением [22].

В настоящей работе проведены оценка применимости данных MODIS Atmospheric Profile Product как источника информации о параметрах неус-

тойчивости атмосферы в случаях с сильными шквалами, смерчами и крупным градом на европейской территории России (ЕТР) и Урале, а также их сопоставление с данными реанализа ERA5. Подобный анализ ранее не проводился.

Данные и методы

Выборка КОЯП была сформирована на основе базы данных ветровалов в лесной зоне ЕТР [23] и базы данных КОЯП в Центральном федеральном округе (ЦФО) [24]. Она включает шквалы и смерчи, вызвавшие ветровалы на ЕТР, несколько случаев, вызвавших ветровалы в Зауралье [25, 26], а также шквалы, зафиксированные на основе данных метеостанций (со скоростью порывов ветра ≥ 25 м/с) или сообщений о значительном ущербе на территории ЦФО. Данные о крупном граде были получены только для территории ЦФО, причем рассматривались лишь те случаи, когда диаметр градин превышал 30 мм и имелись сведения об ущербе. При формировании выборки случаев крупного града также были исключены те, когда град сопровождался шквалом или смерчем, при этом известно, что основной ущерб был вызван именно сильным ветром, а не градом.

При формировании выборки анализировались события за 2001–2021 гг., что соответствует периоду доступности данных MODIS. Всего анализировалось 305 КОЯП, из которых 160 связаны с ветровалами. Для всех событий было известно время возникновения с точностью ± 1 ч, которое при необходимости уточнялось по данным наземных наблюдений или по снимкам Meteosat/SEVIRI, по которым отслеживались мезомасштабные конвективные системы с характерными сигнатурами [12–14]. С каждым из них связано от одного до десяти и более шквалов и смерчей или случаев крупного града, нанесших ущерб. Так, крупнейшие по числу ветровалов штормовые события наблюдались 7 июня 2009 г., 12 июня 2010 г., 18 июля 2012 г. и 27 июня 2020 г. [23]. Крупнейшее по числу случаев крупного града событие было зафиксировано 15 июня 2012 г., когда сведения об ущербе поступили из 12 населенных пунктов.

Для каждого случая из каталога были загружены данные MOD/MYD07_L2 [27] на основе последнего пролета спутника Terra или Aqua, предшествовавшего возникновению явления. Как и другие тематические продукты MODIS/Atmosphere, данные MOD/MYD07_L2 предоставляются в формате hdf в синусоидальной проекции. Их обработка включала проецирование и извлечение анализируемых параметров.

Поскольку индексы K и TT считаются устаревшими и практически не используются в современной практике прогнозирования КОЯП [9], в настоящей работе анализировалось два параметра – LI и PW. LI характеризует неустойчивость атмосферы, определяемую стратификацией температуры воздуха, и рассчитывается по формуле

$$LI = T_{500} - T_{\text{parcel}},$$

где T_{500} — температура воздуха на изобарической поверхности 500 гПа; T_{parcel} — температура, которую бы имела частица воздуха (термик), поднятая от поверхности по сухой адиабате до уровня конденсации и далее по влажной адиабате до уровня 500 гПа. Для LI, рассчитанного таким способом, используется аббревиатура SB (Surface-Based) [16].

PW характеризует общее влагосодержание атмосферы и рассчитывается по данным MODIS по двум алгоритмам: на основе профиля влажности (отношения смеси) или напрямую из интегрированной влажности по уравнению регрессии [16]. В файлах с данными эти слои имеют названия Water_Vapor и Water_Vapor_Direct, далее обозначаются PW1 и PW2.

При оценке параметров LI и PW по данным MODIS для случаев из рассмотренной выборки КОЯП учитывался ряд ограничений. Во-первых, в большинстве случаев получить значения параметров по данным MODIS непосредственно в точке возникновения КОЯП было невозможно из-за облачности. В связи с этим были вычислены средние, максимальные и минимальные значения LI и PW в радиусе 100 км от места возникновения КОЯП. При расчете учитывались все пиксели, центр которых попадает в пределы данного радиуса. Для случаев с ветровалами построение радиуса для расчета индексов производилось вокруг стартовой точки (т.е. места возникновения шквала или смерча), а не вокруг центра вала ветровала.

Во-вторых, большинство случаев КОЯП наблюдалось в период послеполуденного максимума развития конвекции, тогда как съемка со спутников Terra и Aqua производится около полудня по местному времени. Например, для Московской обл. время пролетов спутников Terra и Aqua составляет 10:30–14:00 по местному времени (дневные пролеты) и 20:30–00:00 (ночные пролеты). В результате дневные данные MODIS в большинстве случаев характеризуют условия в атмосфере не в момент возникновения явления или непосредственно перед его развитием, а за несколько часов до него. Случаи, в которых интервал между временем съемки и возникновением КОЯП превышал 5 ч, были исключены из анализа.

Третьей особенностью является невозможность получения значений индексов при наличии сплошной облачности в рассматриваемой 100-километровой окрестности. Из анализа исключены случаи, когда доля безоблачных пикселей в радиусе составляла менее 10% (~ 150 пикселей).

Перечисленные ограничения привели к существенному сокращению выборки. Так, из начальной выборки в 160 штормовых событий, вызвавших ветровалы (для которых известно время возникновения), в итоговую выборку было включено только 50. Из 145 событий, не связанных с ветровалами, в итоговую выборку включено 16 с крупным градом и 29 со шквалами и смерчами. Только для одного случая в выборке были использованы снимки, полученные в ночное время, в остальных

случаях использовались дневные снимки. Всего итоговая выборка включает 95 случаев, включая 58 со шквалами, 21 со смерчами (в том числе и те, когда также наблюдались шквалы) и 16 с крупным градом. Таким образом, из-за ограничений данных MODIS (редкое время пролета и облачность) анализ проводился только для 31,1% случаев из начальной выборки (95 из 305), что может быть определенной оценкой степени применимости результатов наблюдений с двух полярно-орбитальных спутников для прогнозирования КОЯП.

Полученные по данным MOD/MYD07_L2 значения LI и PW были сопоставлены со значениями аналогичных параметров по данным реанализа ERA5. Расчет происходил по массиву данных за период с 1979 по 2020 г., созданному в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН для территории Северной Евразии. Массив включает рассчитанные значения 50 индексов неустойчивости (термодинамических, динамических, композитных и упрощенных) с пространственным разрешением 31 км и шагом по времени 1 ч.

Для сравнения с данными MODIS были выбраны значения индексов, полученные в ближайший к моменту съемки часовой срок. Они также были рассчитаны в радиусе 100 км от места возникновения шквала или смерча.

Результаты и их обсуждение

Основной особенностью пространственного распределения параметров LI и PW по данным MODIS по сравнению с данными ERA5 является более сильная пространственная изменчивость, что связано с высоким пространственным разрешением данных (рис. 1, цв. вкладка). Значения индексов резко возрастают в ячейках, примыкающих к мезомасштабным конвективным системам (МКС), и в целом вдоль фронтальных зон, где наблюдаются восходящие движения (рис. 2, цв. вкладка). В результате минимальные значения LI, рассчитанные в радиусе 100 км от места возникновения шквала или смерча, в 73% случаев оказались ниже -10 °C, а в 16% случаев — ниже -20 °C, а максимумы PW в 18% случаев превышают 50 мм. По данным ERA5 такие значения не наблюдались ни разу: минимум LI по всей выборке составляет $-8,8$ °C, а максимум PW — 43,4 мм. При этом на удалении от зон активной конвекции неустойчивость и влагосодержание по данным MODIS существенно ниже, чем по данным ERA5 (рис. 1).

Распределение значений индексов в выборке может не соответствовать нормальному, поэтому для сравнения индексов по данным MODIS и ERA5 оценивались медианные значения из средних, максимумов и минимумов, рассчитанных для каждого события в радиусе 100 км от места его возникновения (табл. 1). За счет разного пространственного разрешения данных при относительно небольших различиях в медианных значениях наблюдаются существенные различия в экстремумах — разброс значений индексов по данным MODIS значительно выше, чем по ERA5.

Значения параметров LI и PW по данным MODIS/реанализа ERA5, рассчитанные в радиусе 100 км от места возникновения КОЯП (средние, максимальные и минимальные) для 95 случаев из выборки КОЯП

Параметр	Тип явления	Медиана		
		из средних	из максимумов	из минимумов
LI, °C	Шквал	-3,5/-3,3	0,3/-0,8	-13,9/-4,7
	Смерч или смерч + шквал	-3,4/-3,1	1,6/-1,2	-12,0/-5,6
	Крупный град	-4,5/-2,9	-0,3/-1,0	-13,4/-3,9
PW1, мм	Шквал	35,6/33,7	46,6/37,1	25,8/30,4
	Смерч или смерч + шквал	31,0/31,5	41,0/33,3	21,0/28,1
	Крупный град	36,3/32,5	46,9/33,7	29,0/30,3
PW2, мм	Шквал	36,5*	69,5	26,1
	Смерч или смерч + шквал	34,4	77,0	23,0
	Крупный град	37,5	62,4	28,9

* только по данным MODIS.

При сравнении медианных значений индексов при разных типах явлений можно отметить, что по данным MODIS отмечается более сильная неустойчивость в случаях с крупным градом и более низкое влагосодержание – при возникновении смерчей (в сравнении с другими типами явлений). По данным ERA5 различия менее выражены, а случаи с крупным градом отличаются даже более высокими значениями LI в сравнении с другими типами явлений. Однако оценка межгрупповых различий для трех типов явлений (случаи со шквалами, смерчами и крупным градом), выполненная по непараметрическому тесту Краскела–Уоллиса и медианному тесту, оказалась статистически незначима (на уровне 0,05). Этот результат отличается от ранее опубликованных работ для территории России [3], США и Европы [11]. В них было показано, что смерчи формируются при более слабой конвективной неустойчивости и низком влагосодержании воздуха, чем шквалы и крупный град. Такое расхождение можно объяснить особенностями формирования выборки – смерчи при слабой неустойчивости возникают обычно на фоне значительной облачности, которая не позволяет получить значения индексов по данным MODIS. Следовательно, все подобные события были исключены из анализируемой выборки.

Экстремумы обоих индексов по данным MODIS оказались значительно выше, чем по данным ERA5. Наибольшие различия характерны для минимальных значений LI (чем меньше LI, тем выше неустойчивость). Экстремумы LI по данным MODIS указывают на интенсивные восходящие движения в зонах активной конвекции, которые не могут быть зафиксированы по данным реанализа. Однако осредненные в радиусе 100 км значения LI в большинстве случаев указывают на преобладание умеренной неустойчивости (от -2 до -6 °C). Только в трех случаях оно было ниже -10 °C, что указывает на экстремальную неустойчивость. Все эти случаи связаны со шквалами. Согласно данным MODIS в одном случае минимальное значение LI

в радиусе 100 км от места возникновения КОЯП было положительным, т.е. воздушная масса была устойчивой. Этот случай – единственный из рассматриваемых, наблюдавшийся в ночное время. По данным ERA5 выявлено три случая, когда минимальное значение LI > 0, причем они не совпадают с данными MODIS и связаны с прохождением быстро движущихся холодных фронтов и сменой воздушной массы.

Для экстремумов влагосодержания, рассчитанных по данным MODIS, характерен меньший разброс, при этом максимумы PW2 существенно выше, чем PW1, и превышают аналогичные значения по данным ERA5 более чем в полтора раза. Медианные значения PW1 и PW2 различаются незначительно и очень близки к таковым по данным ERA5. Они указывают на высокое влагосодержание воздуха при КОЯП (по сравнению с обычными условиями), сопоставимое с ранее полученными оценками при возникновении шквалов и смерчей для ЕТР в целом [3] и на территории Пермского края [28].

Распределение значений LI и PW, осредненных в радиусе 100 км от места возникновения КОЯП, показано на рис. 3. Во многих случаях между значениями параметров по данным двух источников наблюдаются сильные расхождения как в одну, так и в другую сторону. Разность значений PW по данным MODIS и ERA5 $PW_{dif} = PW_{MODIS} - PW_{ERA5}$ составляет для отдельных случаев от -9,1 до 12,1 мм, а разность LI ($LI_{dif} = LI_{MODIS} - LI_{ERA5}$) – от -10,2 до 7,2 °C. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена (R_p и R_s соответственно) между значениями LI_{MODIS} и LI_{ERA5} статистически не значимы, а между PW_{MODIS} и PW_{ERA5} – статистически значимы на уровне 0,05 (табл. 2). Тесты Колмогорова–Смирнова и Манна–Уитни показывают, что выборки значений LI и PW по данным MODIS и ERA5 для всех событий относятся к разным генеральным совокупностям. Выборки по данным MODIS характеризуются более сильным разбросом значений, чем по данным ERA5, особенно для LI.

Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между значениями параметров по данным MODIS и ERA5 (полужирным выделены статистически значимые на уровне 0,05)

Параметр	R_P	R_S
LI	0,13	0,13
PW1	0,62	0,62
PW2	0,37	0,39

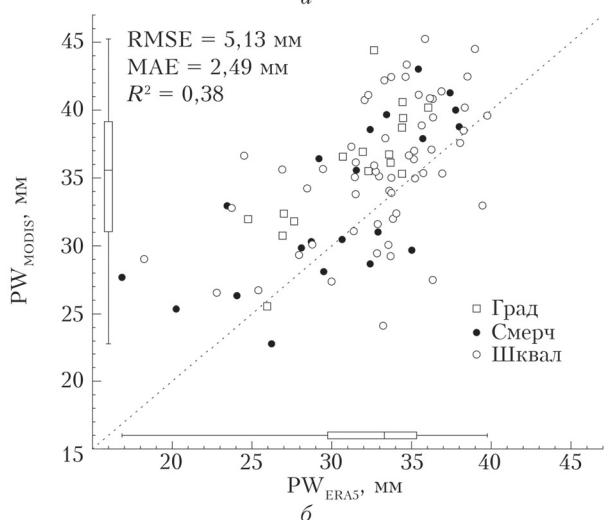
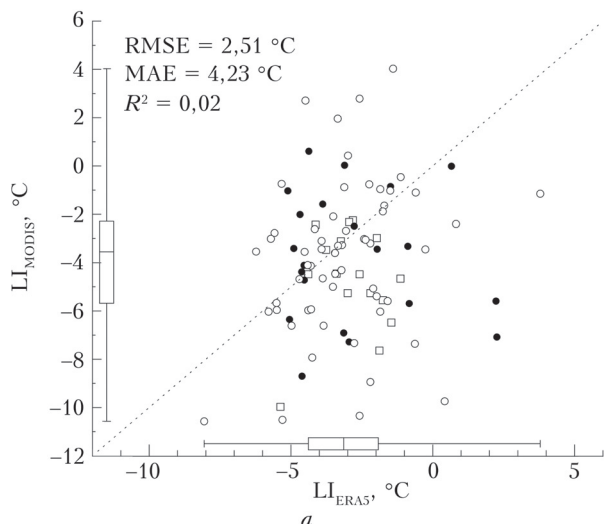


Рис. 3. Диаграмма рассеяния значений LI (а) и PW (б), полученных по спутниковым данным MODIS и данным реанализа ERA5, в случаях КОЯП (с разделением по типу). Также приведены распределение всех КОЯП по разным данным (вдоль осей, в виде «ящика с усами», показывающего разброс между минимальным и максимальным значениями (усы), первый и третий квартили (ящик) и медиану); среднеквадратичное отклонение (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и коэффициент детерминации (R^2) между данными MODIS и ERA5, рассчитанные по всей выборке КОЯП

Выявлена статистически значимая обратная зависимость между PW_{dif} и LI_{dif} : R_P и R_S равны $-0,78$, т.е. в большинстве случаев, когда влагосодержание по данным MODIS завышено в сравнении с данными ERA5, также завышается конвективная неустойчивость (LI по данным MODIS ниже, чем по данным ERA5) и наоборот (рис. 4, а).

Как отмечено выше, в большинстве случаев данные MODIS были получены не в момент возникновения КОЯП, а за 2–4 ч до него. Средний интервал времени между получением снимка MODIS и возникновением явления составляет 143 мин, разброс – от 10 до 300 мин (рис. 4, б). С учетом этого была проверена гипотеза о наличии зависимости между величиной этого интервала времени

и значениями индексов. Статистически значимой корреляции не было выявлено ни для данных MODIS, ни для ERA5. Оценка производилась для средних и экстремальных значений, а также для всей выборки и с исключением случаев, которые были связаны с малоподвижными фронтальными зонами, но результаты при этом существенно не изменились.

Высокое пространственное разрешение данных MODIS Atmosphere Profile Product позволяет проанализировать влияние свойств подстилающей

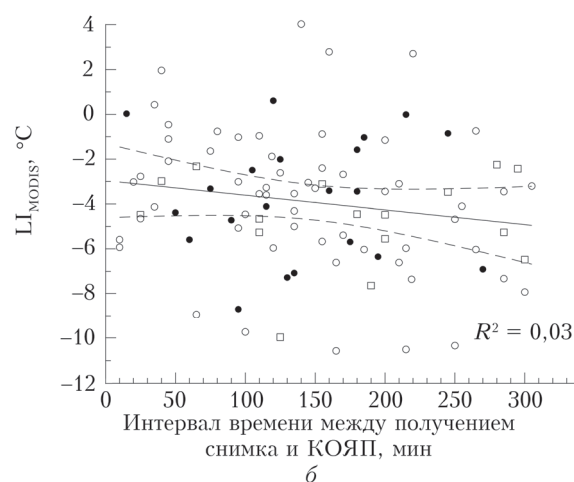
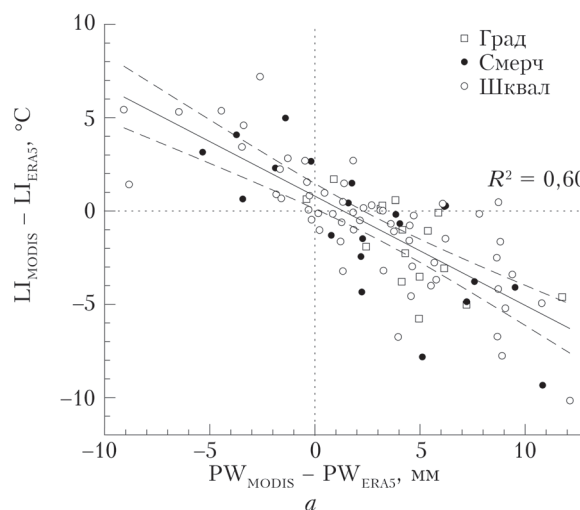


Рис. 4. Зависимость между PW_{dif} и LI_{dif} (а), зависимость значений LI (по данным MODIS) от интервала времени между получением спутникового снимка и возникновением КОЯП (б), а также линейная аппроксимация зависимости (с 99% доверительным интервалом) и соответствующий коэффициент детерминации

поверхности на неустойчивость и влагосодержание воздушной массы (при отсутствии облачности). В частности, обнаруживается снижение неустойчивости и влагосодержания над поверхностью крупных водохранилищ, выраженное в первой половине лета, или увеличение их над Московской агломерацией (рис. 5, цв. вкладка). Эта особенность данных может быть использована в исследованиях влияния свойств подстилающей поверхности на развитие случаев шквалов и смерчей. В настоящей работе подобный анализ не проводился.

Заключение

Применимость данных MODIS Atmosphere Profile Product для диагностики условий возникновения сильных шквалов и смерчей ограничивается низкой частотой съемки и невозможностью построения профилей температуры и влажности для ячеек с облачностью. В результате параметры неустойчивости и влагосодержания удалось получить лишь для 31% событий. Более высокая вероятность обнаружения зоны неустойчивости по данным MODIS характерна в случаях, когда развитие КО-ЯП следует за малооблачным периодом, например при разрушении блокирующего антициклона или даже в его пределах. Подобные случаи имели место летом 2010 г., в частности для события деречо 27 июня 2010 г. [29].

Однако можно выделить и некоторые преимущества спутниковых данных. За счет высокого пространственного разрешения они позволяют получить качественно новую информацию о пространственном распределении неустойчивости и влагосодержания атмосферы по сравнению с данными любого доступного реанализа. Хотя и обнаружена высокая согласованность медианных значений индексов по данным MODIS и ERA5, для экстремальных значений отмечены существенные различия. Например, по данным MODIS фиксируются локальные либо протяженные вдоль фронтальных зон области с очень сильной неустойчивостью ($LI < -10^\circ$) и высоким влагосодержанием воздуха ($PW > 50$ мм). Локальные неоднородности в поле влагосодержания и неустойчивости, выявляемые по данным MODIS, также могут быть связаны с влиянием типов подстилающей поверхности, в частности крупных водоемов или городской застройки. Более детальный анализ этих закономерностей может быть полезен при изучении инициации глубокой конвекции.

В настоящей работе, в отличие от ранее опубликованных [17, 19], параметры атмосферы по данным MODIS сопоставлялись не с данными аэрологического зондирования, а с данными реанализа. Корректное сопоставление с данными радиозондирования для исследуемой территории невозможно, поскольку интервал времени между получением снимков и запуском радиозондов в большинстве случаев превышает 2 ч, а сеть станций зондирования весьма редка. Данные ERA5 лишены этих не-

достатков, но при сравнении необходимо учитывать их ограничения, в частности, недооценку параметров неустойчивости атмосферы, рассчитываемых по методу частицы, к которым относится и индекс LI [11]. Эта особенность реанализа ERA5, выявленная при сравнении с данными аэрологического зондирования [11], может частично (наряду с разным пространственным разрешением данных) объяснить полученные в настоящей работе различия в оценке индексов по данным реанализа и спутниковым данным.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-776).

Список литературы

1. Rasmussen E.N., Blanchard D.O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // *Weather Forecast.* 1998. V. 13. P. 1148–1164.
2. Brooks H.E., Doswell III C.A., Zhang X., Chernokulsky A., Tochimoto E., Hanstrum B., Nascimento E., Sills D., Antonescu B., Barrett B. A Century of Progress in Severe Convective Storm Research and Forecasting. AMS, 2019. Chapter 18. P. 18.1–18.41.
3. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Костарев С.В., Быков А.В. Условия возникновения сильных шквалов и смерчей, вызывающих крупные ветровалы в лесной зоне Европейской части России и Урала // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 2. С. 35–49.
4. Chakraborty S., Fu R., Massie S.T., Stephens G. Relative influence of meteorological conditions and aerosols on the lifetime of mesoscale convective systems // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2016. V. 113, N 27. P. 7426–7431.
5. Chen Q., Fan J., Yin Y., Han B. Aerosol impacts on mesoscale convective systems forming under different vertical wind shear conditions // *J. Geophys. Res: Atmos.* 2020. V. 125, N 3. DOI: 10.1029/2018JD030027.
6. Púčik T.P., Groenemeijer P., Rýva D., Kolár M. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in central Europe // *Mon. Weather Rev.* 2015. V. 143. P. 4805–4821.
7. Taszarek M., Brooks H.E., Czernecki B. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe // *Mon. Weather Rev.* 2017. V. 145. P. 1511–1528.
8. Brooks H.E. Proximity soundings for severe convection for Europe and the United States from reanalysis data // *Atmos. Res.* 2009. V. 93. P. 546–553.
9. Taszarek M., Allen J.T., Púčik T., Hoogewind K.A., Brooks H.E. Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes // *J. Clim.* 2020. V. 33, N 24. P. 10263–10286.
10. Taszarek M., Brooks H. E., Czernecki B., Szuster P., Fortuniak K. Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-Interim and sounding data // *J. Clim.* 2018. V. 31. P. 4281–4308.
11. Taszarek M., Pilguy N., Allen J.T., Gensini V., Brooks H.E., Szuster P. Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America // *J. Clim.* 2021. V. 34, N 8. P. 3211–3237.
12. Adler R.F., Markus M.J., Fenn D.D. Detection of severe Midwest thunderstorms using geosynchronous satellite data // *Am. Meteorol. Soc.* 1985. V. 113. P. 769–781.

13. *Setvák M., Lindsey D.T., Novák P., Wang P.K., Radová M., Kerkmann J., Grasso L., Su S-H., Rabin R.M., Štástka J., Charvát Z.* Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds // *Atmos. Res.* 2010. V. 97, N 1–2. P. 80–96.
14. *Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Спрыгин А.А., Ажигов И.О.* Идентификация мезомасштабных конвективных облачных систем со смерчами по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2019. Т. 16, № 1. С. 223–236.
15. *Mitra A.K., Sharma A.K., Bajpai I., Kundu P.K.* An atmospheric instability derived with MODIS profile using real-time direct broadcast data over the Indian region // *Nat. Hazards.* 2012. V. 63, N 2. P. 1007–1023.
16. *Borbas E., Seemann S.W., Kern A., Moy L., Li J., Gumley L., Menzel W.P.* MODIS atmospheric profile retrieval algorithm theoretical basis document collection 6, 2011. 32 p. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod07.php>.
17. *Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е.* Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // *Метеорол. и гидрол.* 2015. № 5. С. 10–19.
18. *Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Разумова О.В.* Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования // *Вестн. Том. гос. ун-та.* 2012. № 3365. С. 169–174.
19. *Нечепуренко О.Е.* Идентификация мезомасштабной конвекции по данным спутникового мониторинга: дис. канд. физ.-мат. наук. Томск, 2020. 138 с.
20. *Xavier V.F., Chandrasekar A., Singh R., Simon B.* The impact of assimilation of MODIS data for the prediction of a tropical low-pressure system over India using a mesoscale model // *Int. J. Remote Sens.* 2006. V. 27. P. 4655–4676.
21. *Govindankutty M., Chandrasekar A.* Effect of 3DVAR assimilation of MODIS temperature and humidity profiles on the dynamic and thermodynamic features of three monsoon depressions over the Bay of Bengal // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2010. V. 107. P. 65–79.
22. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hylm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N.* The ERA5 global reanalysis // *Quant. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146. P. 1999–2049.
23. *Shikhov A.N., Chernokulsky A.V., Azhigov I.O., Semakina A.V.* A satellite-derived database for stand-replacing windthrow events in boreal forests of European Russia in 1986–2017 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2020. V. 12. P. 3489–3513.
24. *Шихов А.Н., Абдуллин Р.К., Чернокульский А.В., Ажигов И.О., Ярынич Ю.И., Спрыгин А.А., Корнев Д.П.* Создание картографической базы данных и веб-сервиса «Конвективные опасные метеорологические явления на территории Центрального федерального округа» // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинф. обеспечение устойчивого развития территорий: материалы междунар. конф. М: Геогр. факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 3. С. 120–135.*
25. *Chernokulsky A.V., Shikhov A.N., Bykov A.V., Azhigov I.O.* Satellite-based study and numerical forecasting of two tornado outbreaks in the Ural region in June 2017 // *Atmosphere.* 2020. V. 11, N 11. DOI: 10.3390/atmos11111146.
26. *Чернокульский А.В., Курганский М.В., Мохов И.И., Шихов А.Н., Ажигов И.О., Селезнева Е.В., Захарченко Д.И., Антонеску Б., Куне Т.* Смерчи в российских регионах // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 2. С. 17–34.
27. *LAADS DAAC.* Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center. [Electron resource]. URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> (last access: 31.05.2021).
28. *Shikhov A., Chernokulsky A., Kalinin N., Bykov A., Pischalnikova E.* Climatology and formation environments of severe convective windstorms and tornadoes in the Perm region (Russia) in 1984–2020 // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 11. DOI: 10.3390/atmos12111407.
29. *Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y.* Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // *Atmos. Res.* 2022. V. 267. Art. No. 105928.

A.N. Shikhov, A.V. Chernokulsky, A.A. Sprygin, Yu.I. Yarinich. **Estimation of convective atmospheric instability during squalls, tornadoes, and large hail events from satellite observations and ERA5 reanalysis data.**

We consider the usefulness of satellite data to estimate atmospheric instability and precipitable water vapor for the cases with severe convective events occurred over the European Russia and the Ural region. The initial sample includes 305 squalls, tornado, and large hail events. We evaluated the values of the instability parameter Lifted Index (LI) and precipitable water vapor (PW) using MODIS Atmospheric Profile Product data as well as the ERA5 reanalysis data. It was found that the median values of LI and PW according to the MODIS and ERA5 data are rather close, while the extreme values substantially differ. Local areas with very strong instability and high PW were identified from MODIS data, but not detected according to the reanalysis data. We found major limitations of the MODIS data associated with rather low frequency of imagery and the lack of information on the instability parameters for cloudy pixels. In particular, it reduced the sample size from 305 to 95 cases.

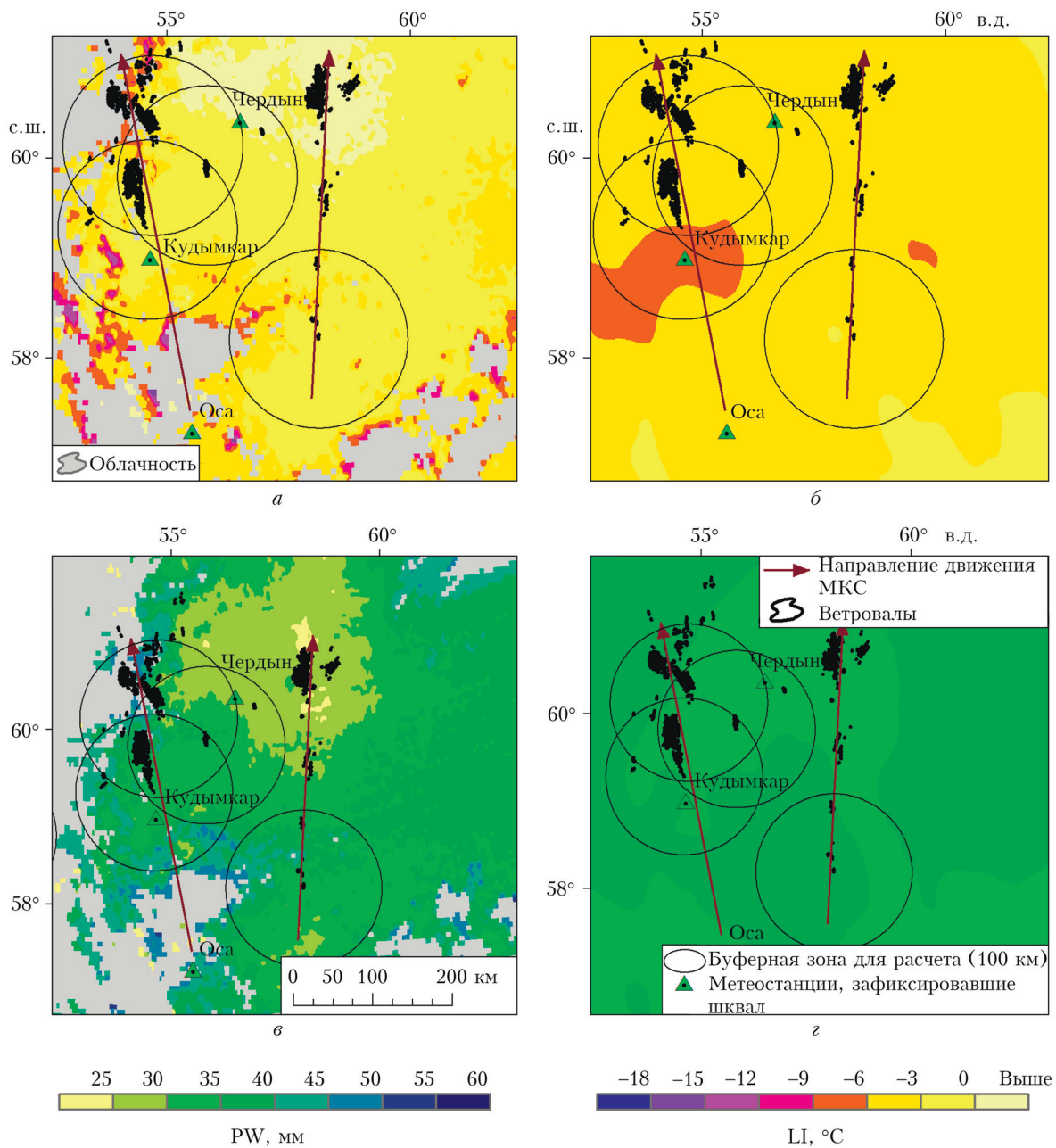


Рис. 1. Пространственное распределение значений параметров LI и PW по данным MODIS (*a*, *в*) и ERA-5 (*б*, *г*) в случае со шквалами 18 июля 2012 г., 08:25 ВСВ (по данным ERA5 – 08:00 ВСВ)

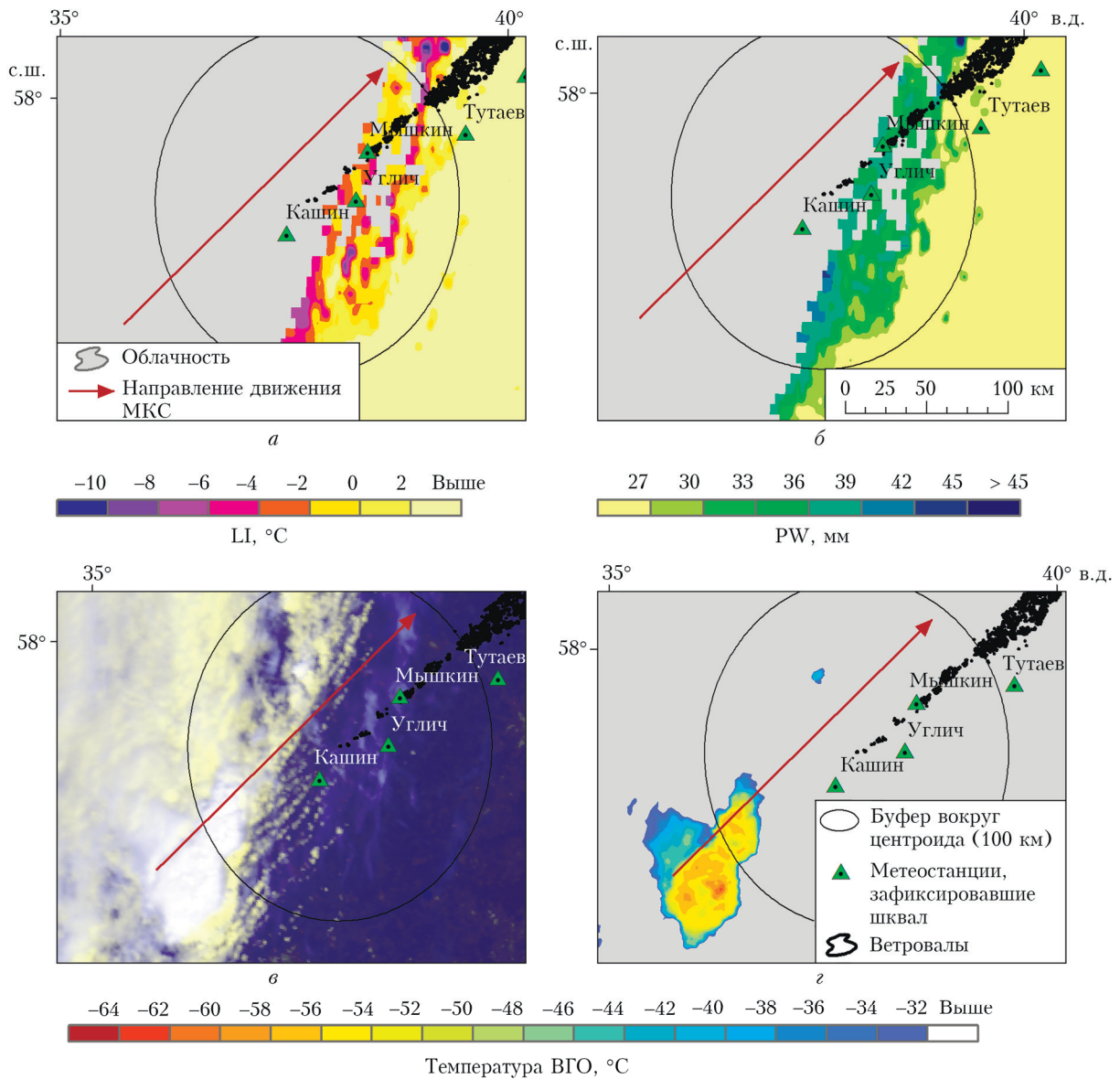


Рис. 2. Значения параметров LI (а) и PW (б) по данным MODIS на участке холодного фронта при формировании МКС, вызвавшей сильный шквал (деречо) 27 июня 2010 г., а также RGB-изображение МКС (в) и температура верхней границы облаков (ВГО) (z) по тому же снимку Terra/MODIS

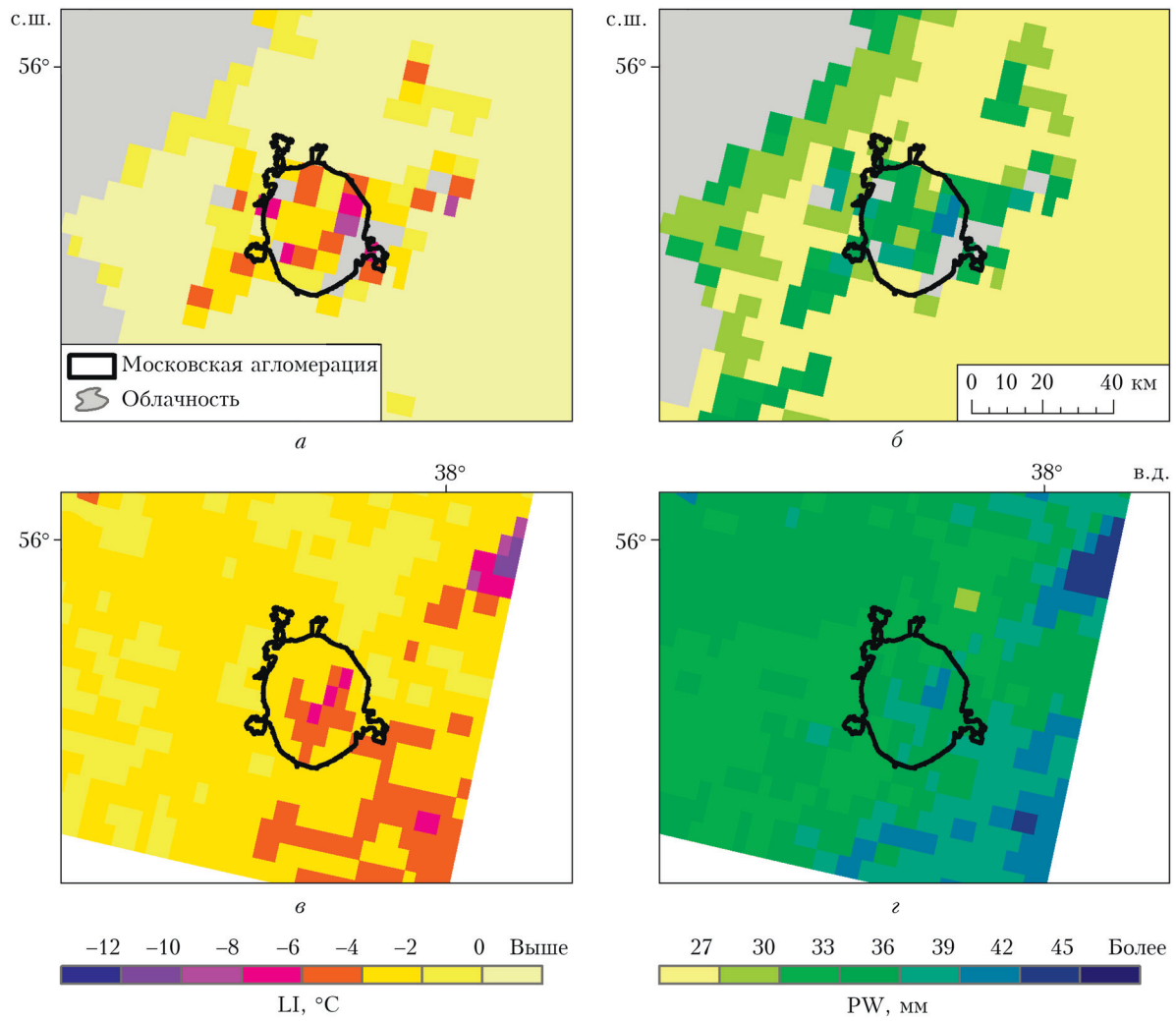


Рис. 5. Особенности распределение параметров LI и PW по данным MODIS над Московской агломерацией и прилегающей территорией для 27 июня (*a*, *б*) и 22 июля 2010 г. (*в*, *г*)