УДК 551.515/4

Научная статья

Пространственно-временная изменчивость конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным реанализа ERA5

К. Н. Пустовалов^{1,2}, В. П. Горбатенко², П. М. Нагорский¹, О. Е. Нечепуренко²

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
г. Томск, пр. Академический 10/3, 364055, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, пр. Ленина 36, 634050, Россия.

E-mail: const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, npm_sta@mail.ru

Представлены результаты сравнительного анализа пространственно-временной изменчивости конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным индексов неустойчивости K-Index и Total Totals, полученных из реанализа ERA5. Показано, что по значениям обоих индексов максимум конвективной неустойчивости над югом Западной Сибири приходится на Кулундинскую равнину и пойму верхнего течения р. Иртыш. Кроме того, высокие значения индексов наблюдаются над юго-востоком Урала и северо-востоком Васюганской равнины. Северная граница со значениями $KI_{Q1} \geq 30$ °C и $TT_{Q1} \geq 50$ °C, указывающими на вероятность образования гроз 70%, простирается до 62° и 61° с.ш. соответственно. За период 1990–2019 гг. в динамике среднегодовых значений KI_{Q1} , в целом по территории, преобладает положительный тренд, а в динамике TT_{Q1} на большей части территории значимые изменения отсутствуют, однако отмечается цикличность с периодом ~ 10 лет.

Ключевые слова: конвекция, индексы неустойчивости, индекс K-index, индекс Total Totals, гроза, реанализ ERA5

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215

Поступила в редакцию: 22.10.2021

В окончательном варианте: 15.11.2021

Для цитирования. Пустовалов К. Н., Горбатенко В. П., Нагорский П. М., Нечепуренко О. Е. Пространственно-временная изменчивость конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным реанализа ERA5 // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2021. Т. 37. № 4. С. 203-215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Пустовалов К. Н. и др., 2021

Финансирование. Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (номер госрегистрации 121031300154-1).

Введение

Конвективная деятельность ежегодно продуцирует все большее количество неблагоприятных и опасных явлений погоды (ливни, грозы, град, шквалы, смерчи, и др.) ([1]–[5]). Современное глобальное изменение климата ведёт к увеличению приземной температуры и, как следствие, обуславливает рост абсолютной влажности воздуха и уменьшение статической устойчивости в пограничном слое атмосферы, которые, в свою очередь, способствуют развитию глубокой конвекции [6]. Во второй половине XX — начале XXI вв. в регионах Северной Евразии, согласно [7], отмечалось увеличение доли конвективной и снижение доли слоистообразной облачности. Сохранение отмеченной тенденции приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных явлений. Над территорией Западной Сибири опасные явления, обусловленные развитием глубокой мезомасштабной конвекции, в последнее десятилетие стали регистрироваться гораздо чаще, чем до 2000 г. ([8], [9]). Кроме того, увеличилось число циклонов, которые образуются над Западной Сибирью и оказывают влияние на увеличение повторяемости опасных конвективных явлений [10]. Об интенсификации конвективных процессов также свидетельствует и то, что верхняя граница кучево-дождевых облаков в день с грозой и градом стала достигать уровня 200 гПа (9–11 км), что является свидетельством увеличения высоты тропопаузы [11]. Самым ярким свидетельством увеличения неустойчивости атмосферы в последнее десятилетие, является тот факт, что на широте 60° с.ш. (в районе г. Ханты Мансийка) практически ежегодно регистрируются смерчи, не характерные для этого региона ранее ([12]–[14]).

В формировании и трансформации облаков конвективных форм, а также связанных с ними неблагоприятных и опасных атмосферных явлений важную роль играют вертикальные движения воздуха, интенсивность которых определяется динамическими, термическими и орографическими факторами. Восходящие потоки термического происхождения связаны с неустойчивой стратификацией атмосферы. Основным фактором, вызывающим их, являются конвективные движения либо в форме теплых струй воздуха, либо в форме отдельных замкнутых объемов теплого воздуха – «термиков», «пузырей». Эти потоки достигают наибольшего развития в середине дня (13–16 часов местного времени). Кроме того, восходящие потоки термического происхождения могут возникать и в ночное время вследствие различного излучения тепла отдельными участками земли ([1]–[5], [15]–[17]).

Для оценки степени неустойчивости атмосферы и вероятности развития конвективной облачности и сопутствующих явлений применяются индексы неустойчивости. Первые индексы неустойчивости или стабильности разрабатывались в 40–50-х годах XX в. и служили вспомогательным инструментом для оперативного прогноза опасных явлений погоды. В настоящее время существует несколько десятков различных индексов неустойчивости. При этом наиболее «популярными» и чаще всего используемыми для решения научно-практических задач являются индексы: K-index, Total Totals, Lifted index, CAPE, CIN и SWEAT. Индексы рассчитываются на основе вертикальных профилей метеорологических величин, определяемых посредством аэрологического зондирования, дистанционного зондирования из космоса или математического моделирования. Основная часть индексов, как например K-index и Total Totals, вычисляется по данным температуры воздуха и характеристик влажности на фиксированных уровнях в тропосфере ([18]–

[20]). Для расчёта отдельных индексов необходима интегральная информация о температуре и влажности по всей толще тропосферы и информация о сдвиге ветра (соответственно, индексы CAPE и SWEAT) ([21], [22]).

Значения индексов зависят от степени неустойчивости атмосферы и характеризуют потенциал углубления конвекции в воздушной массе, господствующей над определенным местом. С помощью пороговых значений индексов неустойчивости представляется возможным количественно оценивать вероятность развития всего спектра опасных конвективных явлений. При этом главным достоинством индексов неустойчивости является универсальность, поскольку с их помощью сравнивают параметры конвекции в разных по физико-географическим характеристикам регионах мира и изучают динамику и эволюцию метеорологических явлений, связанных с конвекцией.

Важнейшим практическим преимуществом индексов является их использование в прогнозе развития ливней, гроз, града, шквала, смерчей. Для этого рассчитанные значения индексов неустойчивости атмосферы сравнивают с полученными ранее статистическими пороговыми значениями, характерными для наличия в данном регионе того или иного явления. Кроме того, индексы неустойчивости применяются в мезомасштабных моделях прогноза погоды (например, в WRF-ARW) при интерпретации результатов численного моделирования пространственного положения зон с наличием опасных конвективных явлений.

На сегодняшний день существует ряд информационных продуктов, получаемых на основе спутниковых данных, в которых содержатся восстановленные значения ряда индексов неустойчивости, в частности, продукты MOD07_L2 (MODIS Terra) и MYD07_L2 (MODIS Aqua). Кроме того, современные атмосферные реанализы, пространственно-временное разрешение которых достигло β -мезомасштаба [17], в качестве выходной продукции предоставляют расчетные значения некоторых индексов неустойчивости, например, это реализовано в реанализе ERA5.

Разработка и применение индексов неустойчивости для конкретной страны зависит от используемых методов прогноза и предикторов, а также климатологии опасных конвективных явлений. Отдельным научным направлением является адаптация индексов неустойчивости и определение их пороговых значений для использования в прогнозе и диагнозе опасных конвективных явлений над разными географическими районами с разным конвективным потенциалом атмосферы. Результаты исследований конвективных процессов с применением индексов неустойчивости в различных регионах России, в том числе в Западной Сибири, представлены в работах ([23]–[33]) и демонстрируют сходства и различия пороговых значений индексов над разными территориями.

Целью данной работы является анализ пространственно-временной изменчивости конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири за летние месяцы 1990–2019 гг. по данным индексов неустойчивости, полученных из реанализа ERA5.

2. Используемые данные и методика их обработки

Для решения поставленной цели в исследовании были использованы данные реанализа ERA5, который является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений Европейского центра среднесрочных прогнозов (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>). В

основе реанализа лежит ретроспективное восстановление состояния атмосферы на основе численной модели с ассимиляцией данных из различных источников (полученных на основе различных методов и средств измерений). Данные ERA5 представляют собой 4D-массивы, содержащие значения различных величин в узлах регулярной сетки по долготе, широте и высоте (глубине), а также в последовательные моменты времени (сроки). Применение этого реанализа обусловлено рядом его достоинств: непрерывными рядами данных за период более 40 лет (доступны данные с 1950 г., а надёжные данные – с 1979 г. по н.в.), высоким пространственным ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) и часовым разрешением. Данные реанализа ERA5 в формате NetCDF загружаются с сервера Copernicus Climate Change Service (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)

В исследовании были использованы продукты ERA5 «K-Index» и «Total Totals» за период с июня по август 1990–2019 гг. в сроки 6, 9 и 12 UTC, которые соответствуют 13, 16 и 19 часам местного времени.

Индексы неустойчивости K-index (далее *KI*) и Total Totals (далее *TT*) рассчитываются по формулам:

$$KI = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700}),$$
$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2 \times T_{500},$$

где T — температура воздуха ($^\circ\text{C}$), Td — температура точки росы ($^\circ\text{C}$) на указанных изобарических уровнях (850, 700 и 500 гПа).

Оба индекса характеризуют температурно-влажностное состояние атмосферы в слое от 1500 м (850 гПа) до 5500 м (500 гПа). Значения индекса *KI* также учитывают состояние промежуточного слоя атмосферы на уровне 3000 м (700 гПа).

Обработка и анализ данных индексов неустойчивости *KI* и *TT* производились для юга Западной Сибири, за который принималась территория $50\text{--}64^\circ$ с.ш., $60\text{--}95^\circ$ в.д. Территория исследования разбивалась на расчётную сетку с шагом $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по долготе и широте (58×142 регулярных узлов).

Посредством среды программирования MATLAB (The MathWorks, Inc.) производилась пакетная обработка данных индексов *KI* и *TT*, полученных из реанализа ERA5, в ходе которой для каждого узла расчётной сетки в каждый год вычислялись соответствующее 75-перцентилю значения *KI* и *TT* (KI_{P75} и TT_{P75}) и отбирались значения этих индексов большие или равные KI_{P75} и TT_{P75} , соответственно. На основе отобранных значений вычислялись средние значения индексов *KI* и *TT*, соответствующие первому квартилю повторяемости, то есть условиям повышенной неустойчивости в атмосфере (далее KI_{Q1} и TT_{Q1}). Поскольку характеристикам конвекции в атмосфере свойственно наличие суточного хода, расчёт выполнялся для сроков 6, 9 и 12 UTC, соответствующих началу, максимуму и окончанию активной конвективной деятельности. На основе значений KI_{Q1} и TT_{Q1} за отдельные годы вычислялись их среднеарифметические значения для декад и в среднем для всего 30-летнего периода исследования в каждом узле сетки. Блок-схемы алгоритмов обработки данных индексов *KI* и *TT* представлены на рис. 1.

Далее строились карты пространственного распределения рассчитанных значений индексов KI_{Q1} и TT_{Q1} на юге Западной Сибири в различные сроки, как в целом за период 1990–2019 гг., так и за отдельные входящие в него декады. Для оценки пространственной изменчивости тенденций изменения среднегодовых значений KI_{Q1} и TT_{Q1} за период исследования для каждого узла сетки рассчитывались

коэффициенты линейного тренда $a(KI_{Q1})$ и $a(TT_{Q1})$, а также производилось их картирование.

Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов отбора и обработки данных индексов неустойчивости KI (а) и TT (б), полученных из реанализа ERA5. На схемах: i , j и k — счётчики циклов, перебирающих узлы сетки вдоль широты, долготы и за различные моменты времени соответственно; $n(i, j)$ — счётчик значений, соответствующих заданному условию; 75-percentile и mean — функции, вычисляющие значения 75-перцентиля и среднего арифметического

Кроме того, для некоторых реперных пунктов на территории исследования (города Нижневартовск, Колпашево, Тобольск, Новосибирск и Павлодар) дополнительно строились графики многолетней изменчивости значений KI_{Q1} и TT_{Q1} , а также проводился их регрессионный анализ.

3. Анализ пространственной изменчивости индексов конвективной неустойчивости атмосферы

Согласно рис. 2, в пространственном распределении как KI_{Q1} , так и TT_{Q1} максимум конвективной неустойчивости располагается на границе России (Алтайский край, юг Омской области) и Казахстана (Павлодарская область) и приурочен к поймам рек Иртыш и Обь в их верхнем течении.

Рис. 2. Пространственное распределение средних значений KI_{Q1} (а) и TT_{Q1} (б) в срок максимального развития конвекции 9:00 UTC (16:00 LT) по данным ERA5 за летние месяцы 1990–2019 гг

Кроме отмеченного выше главного очага конвективной неустойчивости, над регионом также можно выделить ещё два крупных очага в полях обоих индексов неустойчивости над юго-восточной периферией Урала (Челябинская, Свердловская, Курганская и Тюменская области России и Костанайская область Казахстана) и над средним течением р. Обь (Томская область). При этом первый из этих очагов более ярко проявляется в распределении KI_{Q1} , а второй — в TT_{Q1} .

Расположение области минимума конвективной неустойчивости по данным KI_{Q1} и TT_{Q1} также совпадает. Минимальные значения этих индексов приходятся на средне-

и высокогорные районы Алтайско-Саянской горной страны. Кроме того, пониженные значения отмечаются над Казахским мелкосопочником и Енисейским кряжем.

Северная граница со значениями индексов выше пороговых ($KI_{Q1} \geq 30$ °С и $TT_{Q1} \geq 50$ °С), характеризующих атмосферу как сильно неустойчивую с высокой вероятностью возникновения гроз (более 75 %), простирается до 61–62° с.ш.

При этом, в полях TT_{Q1} над центральной частью Обь-Иртышского междуречья, в целом, отмечается снижение значений, характеризующих конвективную неустойчивость атмосферы и «прогиб» изолинии $TT_{Q1} = 50$ °С вплоть до 56° с.ш. Ослабление неустойчивости над этим районом также прослеживается в значениях KI_{Q1} , но выражено значительно слабее, чем в TT_{Q1} . Ориентируясь на слагаемые уравнений, составляющих значения анализируемых индексов неустойчивости атмосферы, можно предполагать, что значения температурно-влажностных параметров атмосферы исследуемого региона не одинаковы во всей толще слоя от уровня 850 гПа до 500 гПа. Представленные на рис. 2 поля демонстрируют различия температурно-влажностных характеристик среднего слоя атмосферы. Значениям индекса TT_{Q1} свойственно наличие более строгой зональности, чем в случае распределения полей индекса KI_{Q1} , на пространственное распределение которого существенное влияние оказывает, по-видимому, повышенное влагосодержание атмосферы до уровня 700 гПа над болотными системами междуречья Обь-Иртыш.

Сравнение тенденций изменчивости анализируемых значений индексов позволит выявить районы, где температурно-влажностные характеристики атмосферы изменились на фоне меняющегося климата. Соответственно в этих районах можно ожидать увеличения повторяемости опасных конвективных явлений.

4. Анализ многолетней изменчивости индексов конвективной неустойчивости атмосферы

Согласно рис. 3 и 4, за период 1990–2019 гг. в динамике среднегодовых значений KI_{Q1} , в целом по территории исследования преобладает положительный тренд. Наиболее сильный рост значений KI_{Q1} , достигающий 0,4 °С/10 лет и более, отмечается на северо-востоке территории (к северо-востоку от городов Нижневартовск и Колпашево). Это говорит о том, что над этими районами произошли наибольшие изменения степени неустойчивости атмосферы. Причем неустойчивость увеличилась в слое атмосферы до высоты примерно 3000 м (700 гПа). При этом в южной части исследуемой территории (север Казахстана) отмечаются небольшие очаги с отрицательными значениями тренда (до –0,3 °С/10 лет). Возможно здесь на фоне повышения температуры воздуха, его влагосодержание в слое до 700 гПа уменьшилось.

В динамике TT_{Q1} , в отличие от KI_{Q1} , значимые изменения за 30-летний период на большей части территории исследования отсутствуют, а на северо-западе, юго-западе и юго-востоке даже регистрируется снижение значений этого индекса (–0,2 ÷ –0,3 °С/10 лет). Незначительный рост значений этого индекса прослеживается лишь на западе и юге территории. Вместе с тем, в изменчивости TT_{Q1} , в целом по территории, можно проследить некоторую цикличность с периодом ~ 10 лет. Наиболее хорошо отмеченная цикличность проявляется на севере и востоке рассматриваемой территории, и обусловлена, по-видимому, повторяемостью

синоптических процессов, формирующих глубокую неустойчивость тропосферы во всем ее слое.

Рис. 3. Пространственное распределение коэффициентов линейного тренда среднегодовых значений KI_{Q1} (а) и TT_{Q1} (б) за период 1990–2019 гг. в срок 9:00 UTC (16:00 LT)

Коэффициент корреляции между многолетней динамикой KI_{Q1} и TT_{Q1} за 1990–2019 гг. для всей территории исследования равен 0,78 (при $\alpha = 0,05$), однако имеется различие в направленности и скорости изменения этих индексов за рассматриваемый период. Отмеченное различие, предположительно, связано с различной чувствительностью этих индексов к изменениям, происходящим на различных уровнях в тропосфере. Так, индекс TT включает меньшее число

предикторов чем KI , и в нём не учтены температурно-влажностные условия на уровне 700 гПа.

Рис. 4. Многолетняя изменчивость средних значений KI_{Q1} (а, в, д, ж, и) и TT_{Q1} (б, г, е, з, к) за период 1990—2019 гг. в срок 9:00 UTC (16:00 LT) в Нижневартовске (а, б), Колпашево (в, г), Тобольске (д, е), Новосибирске (ж, з) и Павлодаре (и, к). На рисунке: сплошная и пунктирная чёрные линии – аппроксимации изменчивости KI_{Q1} и TT_{Q1} полиномами 1-й и 4-й степени

Если подробно рассмотреть многолетнюю изменчивость осредненных за летние месяцы каждого года значений KI_{Q1} и TT_{Q1} в разных частях территории (рис. 4), то можно сделать следующие выводы. В районе городов Нижневартовск, Колпашево, Тобольск, Новосибирск и Павлодар, значения KI_{Q1} меняются синхронно, что говорит о единстве макросиноптических процессов, формирующих конвективную

неустойчивость атмосферы в исследуемом регионе. Причем заметное повышение конвективной неустойчивости наблюдается в период после 2003–2005 гг. В значениях индексов TT_{Q1} такого увеличения не наблюдается. Следовательно, можно предположить, что конвективная неустойчивость усиливалась, в основном, за счет нижних слоев атмосферы. Значения индекса TT синхронно изменялись в районах городов Нижневартовск, Колпашево, Новосибирск, постепенно уменьшаясь за период исследования. Только в районах пунктов Тобольск и Павлодар они демонстрируют другую направленность, а именно увеличение конвективной неустойчивости во всем слое. Возможно, это обусловлено различием синоптических процессов, формирующих неустойчивость атмосферы в исследуемом регионе.

Заключение

Проведён сравнительный анализ пространственно-временной изменчивости конвективной неустойчивости на юге Западной Сибири по данным индексов неустойчивости K-Index и Total Totals, полученных из реанализа ERA5.

Отмечено хорошее согласие в расположении максимумов и минимумов конвективной неустойчивости, а также границ зоны сильной неустойчивости над рассматриваемым регионом по данным этих индексов неустойчивости. Наибольшие значения как KI_{Q1} , так и TT_{Q1} отмечаются над Кулундинской равниной и поймой верхнего течения р. Иртыш. Кроме того, высокие значения индексов наблюдаются над юго-востоком Урала и северо-востоком Васюганской равнины. Северная граница со значениями $KI_{Q1} \geq 30$ °C и $TT_{Q1} \geq 50$ °C, характеризующие атмосферу как сильно неустойчивую с вероятностью образования гроз > 70 %, в среднем за 30-летний период простирается до 62° и 61° с.ш. соответственно.

Минимальные значения рассматриваемых индексов приходятся на средне- и высокогорные районы Алтайско-Саянской горной страны, пониженные значения отмечаются над Казахским мелкосопочником и Енисейским кряжем. В целом по территории (без учёта горных районов) в срок 9:00 UTC значения KI_{Q1} и TT_{Q1} изменяются в диапазонах $29 \div 32$ °C и $49 \div 51$ °C соответственно.

За период 1990–2019 гг. в динамике среднегодовых значений KI_{Q1} для всей территории исследования преобладает положительный тренд; наиболее сильный рост значений KI_{Q1} отмечается на юго-востоке и достигает 0,4° и более. В динамике TT_{Q1} на большей части территории значимые изменения за 30-летний период отсутствуют, однако отмечается цикличность с периодом ~ 10 лет.

Полученные результаты позволяют предполагать большее увеличение неустойчивости атмосферы в ее нижних слоях, формирующееся, вероятно, над болотными комплексами Западной Сибири. В результате увеличения средних значений температуры воздуха в летние месяцы и при наличии источников влаги в виде болотных комплексов, неустойчивость нижних слоев атмосферы увеличивается, и это увеличение прослеживается до высоты 700–500 гПа.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

1. Шмeтер С. М. *Термодинамика и физика конвективных облаков*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 288 с. [Shmeter S. M. *Termodinamika i fizika konvektivnykh oblakov*. L.: Gidrometeoizdat, 1987. 288 pp. (In Russian)]
2. Rakov V. A., Uman M. A. *Lightning: Physics and Effects*. New York: Cambridge Univ. Press, 2003. 687 с.
3. Vel'tishchev N. F., Stepanenko V. M. *Mezometeorologicheskiye protsessy*. M.: МГУ, 2006. 101 с.
4. Андреева Е. С. *Опасные явления погоды юга России*. СПб.: РГГМУ, 2006. 216 с. [Andreeva E. S. *Opasnyye yavleniya pogody yuga Rossii*. SPb.: RSHU, 2006. 216 pp. (In Russian)]
5. Bluestein H. B. *Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 456 с.
6. Mokhov I. I., Akperov M. G. Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature from reanalysis data // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2006. Т. 42, № 4, С. 430-438.
7. Chernokulsky A. V., Bulygina O. N., Mokhov I. I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // *Environ. Research Letters*, 2011. Т. 6, № 3, С. 035202.
8. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с. [Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. M.: Rosgidromet, 2014. 1008 pp. (In Russian)]
9. Gorbatenko V. P., Kuzhevskaya I. V., Pustovalov K. N., Chursin V. V., Konstantinova D. A. Assessment of atmospheric convective potential variability in Western Siberia in changing climate // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2020. Т. 45, № 5, С. 360-367.
10. Горбатенко В. П., Тунаев Е. Л., Пустовалов К. Н., Волкова М. А., Нечепуренко О. Е. Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976–2017 гг. // *Фундаментальная и прикладная климатология*, 2020. Т. 2, С. 35-57. [Gorbatenko V. P., Tunaev E. L., Pustovalov K. N., Volkova M. A., Nepochurenko O. E. Izmeneniya tsiklogeneza nad Zapadnoy Sibir'yu v 1976–2017 gg. // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2020. vol. 2, pp. 35-57 (In Russian)]
11. Боровко И. В., Крупчатников В. Н. Математическое моделирование реакции циркуляции Гадлея и стратификации внетропической тропосферы на изменения климата с помощью спектральной модели общей циркуляции атмосферы // *СибЖВМ*, 2015. Т. 18, № 1, С. 27–40. [Borovko I. V., Krupchatnikov V. N. Matematicheskoye modelirovaniye reaktcii tsirkulyatsii Gadleya i stratifikatsii vnetropicheskoy troposfery na izmeneniya klimata s pomoshch'yu spektral'noy modeli obshchey tsirkulyatsii atmosfery // *SibZHVM*, 2015. vol. 18, no. 1, pp. 27-40 (In Russian)]
12. Курганский М. В., Чернокульский А. В., Мохов И. И. Смерч под Ханты-Мансийском: пока исключение или уже симптом // *Метеорология и гидрология*, 2013. № 8, С. 40-50. [Kurganskiy M. V., Chernokul'skiy A. V., Mokhov I. I. Smerch pod Khanty-Mansiyskom: poka isklyucheniye ili uzhe simptom // *Meteorologiya i gidrologiya*, 2013. no. 8, pp. 40-50 (In Russian)]
13. Chernokulsky A. V., et al. Tornadoes in northern Eurasia: From the middle age to the information ERA // *Monthly Weather Review*, 2020. Т. 148, С. 3081-3110.
14. Chernokulsky A. V., et al. Tornadoes in the Russian regions // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. Т. 46, № 2, С. 69-82.
15. Glazunov A. V., Dymnikov V. P. Spatial spectra and characteristic horizontal scales of temperature and velocity fluctuations in the convective boundary layer of the atmosphere // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2013. Т. 49, № 1, С. 33-54.
16. Горбатенко В. П., Дульзон А. А. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // *География и природные ресурсы*, 1997. № 2, С. 142-146. [Gorbatenko V. P., Dul'zon A. A. Vliyanie izmeneniya podstilayushchey poverkhnosti na grozovuyu aktivnost' // *Geografiya i prirodnnyye resursy*, 1997. no. 2, pp. 142-146 (In Russian)]
17. Седунов Ю. С. и др. *Атмосфера. Справочник*. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 508 с. [Sedunov YU. S., et al. *Atmosfera. Spravochnik*. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 508 pp. (In Russian)]
18. Showalter A. K. A stability index for forecasting thunderstorms // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1947. № 34, С. 250-252.
19. Galway J. G. The Lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1956. Т. 3, С. 528-529.
20. George J. J. *Weather forecasting for aeronautics*. New York, London: Academic Press, 1960. 684 с.

21. Blanchard D. O. Assessing the vertical distribution of convective available potential energy // *Weather Forecasting*, 1998. № 13, С. 870-877.
22. Miller R. C. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Headquarters, Air Weather Service: USAF, 1972. 190 с.
23. Gubenko I. M., Rubinshtein K. G. Analysis of the results of thunderstorm forecasting based on atmospheric instability indices using the WRF-ARW numerical model data // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015. Т. 40, № 1, С. 16-24.
24. Горбатенко В. П., Нечепуренко О. Е., Кречетова С. Ю., Беликова М. Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования // *Оптика атмосферы и океана*, 2016. Т. 29, № 7, С. 603-607. [Gorbatenko V. P., Nechepurenko O. Ye., Krechetova S. YU., Belikova M. YU. Verifikatsiya parametrov neustoychivosti atmosfery, vosstanovlennyykh po dannym spektrodiametra MODIS/Terra dannymi aerologicheskogo zondirovaniya // *Optika atmosfery i okeana*, 2016. vol. 29, no. 7, pp. 603-607 (In Russian)].
25. Быков А. В., Ветров А. Л., Калинин Н. А. Прогноз опасных конвективных явлений в Пермском крае с использованием глобальных прогностических моделей // *Труды Гидрометцентра России*, 2017. Т. 363, С. 101-119. [Bykov A. V., Vetrov A. L., Kalinin N. A. Prognoz opasnykh konvektivnykh yavleniy v Permskom krae s ispol'zovaniyem global'nykh prognosticheskikh modeley // *Trudy Gidromettsentra Rossii*, 2017. vol. 363, pp. 101-119 (In Russian)].
26. Chernokulsky A. V., Kurgansky M. V., Mokhov I. I. Analysis of changes in tornadogenesis conditions over Northern Eurasia based on a simple index of atmospheric convective instability // *Doklady Earth Sciences*, 2017. Т. 477, № 2, С. 1504-1509.
27. Нечепуренко О. Е., Горбатенко В. П., Константинова Д. А., Севастьянов В. В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2018. № 2(368), С. 44-59. [Nechepurenko O. Ye., Gorbatenko V. P., Konstantinova D. A., Sevast'yanov V. V. Indeksy neustoychivosti atmosfery i ikh porogovyie znacheniya, optimal'nyye dlya prognoza groz nad Sibir'yu // *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2018. no. 2(368), pp. 44-59 (In Russian)].
28. Сивков Б. А., Калинин Н. А. Особенности термодинамического состояния атмосферы при сильных осадках на территории Пермского края // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 2020. № 1(375), С. 83-95. [Sivkov B. A., Kalinin N. A. Osobennosti termodinamicheskogo sostoyaniya atmosfery pri sil'nykh osadkakh na territorii Permskogo kraya // *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2020. no. 1(375), pp. 83-95 (In Russian)].
29. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г. Тестирование комплексного метода прогноза молниевой активности // *Оптика атмосферы и океана*, 2020. Т. 33, № 12, С. 949-957. [Gubenko I. M., Rubinshteyn K. G. Testirovaniye kompleksnogo metoda prognoza molniyevoy aktivnosti // *Optika atmosfery i okeana*, 2020. vol. 33, no. 12, pp. 949-957 (In Russian)].
30. Gorbatenko V. P., Pustovalov K. N., Konstantinova D. A. Convective potential of the atmosphere of Western Siberia amid global climate change // *IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences*, 2020. Т. 611, С. 012001.
31. Nechepurenko O. E., Gorbatenko V. P., Konstantinova D. A., Pustovalov K. N. Linking the storm cells position and high values of instability indices – a case study in the southeast of Western Siberia // *Journal of Physics. Conference Series*, 2020. Т. 1604, С. 012006.
32. Zhukova V. A., et al. Spatial-temporal variability of temperature stratification of the lower atmosphere layer during the development of abnormally early thunderstorms and squalls // *Proc. SPIE*, 2020. Т. 11560, С. 115606U.
33. Kalinin N. A., et al. Environments of formation of severe squalls and tornadoes causing large-scale windthrows in the forest zone of European Russia and the Ural // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2021. Т. 46, № 2, С. 83-93.

MSC 86A10

Research Article

The spatial and temporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to ERA5 reanalysis data

K. N. Pustovalov^{1,2}, V. P. Gorbatenko², P. V. Nagorskiy¹, O. E. Nechepurenko²

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Academicheskoy ave. 10/3, 364055, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Lenin ave. 36, 634050, Russia.

E-mail: const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, npm_sta@mail.ru

A comparative analysis of the spatio-temporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to the K-Index and Total Totals index obtained from the ERA5 reanalysis is presented. Related to both indices, the Kurlunda plain and the upper Irtysh River floodplain have the highest level of convective instability in the south of Western Siberia. In addition, high index values are observed over the southeastern Urals and the northeastern Vasyugan plain. The northern boundary extends to 62° and 61° N, respectively, with $KI_{Q1} \geq 30$ °C and $TT_{Q1} \geq 50$ °C, indicating a thunderstorm probability greater than 70%. The dynamics of annual average KI_{Q1} values for the territory as a whole are dominated by a positive trend for the period 1990–2019, and there are no significant changes in TT_{Q1} dynamics for most of the territory, but there is cyclicity with a period of ~ 10 years.

Keywords: convection, instability indices, K-index, Total Totals index, thunderstorm, ERA5 reanalysis.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215

Original article submitted: 22.10.2021

Revision submitted: 15.11.2021

For citation. Pustovalov K. N., Gorbatenko V. P., Nagorskiy P. M., Nechepurenko O. E. The spatial and temporal variability of convective instability in the south of Western Siberia according to ERA5 reanalysis data. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **37**: 4, 203–215. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-203-215

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Pustovalov K. N., et al., 2021

Funding. The work was carried out with the support of the state budgetary theme (state registration number 121031300154-1).