

УДК 551.515.4(265.5):519.6

О некоторых способах анализа конвективных процессов в северо-западной части Тихого океана

А.Ю. Филь^{1*}, В.В. Крохин^{1,2}, В.Д. Бокхан¹, В.Ю. Верятин³

¹ *Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток, Россия;*

² *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия;*

³ *Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета",
г. Москва, Россия
afil19893@gmail.com

Представлены результаты анализа особенностей развития атмосферной конвекции в северо-западной части Тихого океана. На основе уравнений Фальковича разработана методика расчета показателя κ , характеризующего разномасштабную конвективную деятельность в регионе. Построены поля параметра «верхний уровень конвекции» для оценки пространственного распределения зон конвективных слоев различной толщины и вероятного положения северной границы тропической атмосферы в регионе. Предложен « κ -анализ» с целью оптимального цифрового, текстового и графического представления полей параметра κ . Для исследования использовались гидрометеорологические данные глобальной прогностической модели GFS.

Ключевые слова: атмосферная конвекция, конвективная деятельность, показатель Фальковича, параметр κ , модель GFS

Some methods of convective activity analysis in the Northwest Pacific

A.Y. Fil^{1*}, V.V. Krokhin^{1,2}, V.D. Bokhan¹, V.Y. Veriatin³

¹ *Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia;*

² *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;*

³ *State Research Center "Planeta", Moscow, Russia
afil19893@gmail.com

The results of the analysis of the development of atmospheric convection in the northwestern Pacific are presented. Based on the Falkovich equations, a method has been developed for calculating the parameter κ characterizing multi-scale convective activity in the region. The fields of the parameter "upper level of convection" were constructed to estimate the spatial distribution of zones of convective layers of different thickness and the probable position of the northern boundary of the tropical atmosphere in the region. A " κ -analysis" is proposed for the purpose of optimal digital, textual and graphical representation of the fields of the parameter κ . The hydrometeorological data of the global forecast model GFS was used for the study.

Keywords: atmospheric convection, convective activity, Falkovich indicator, parameter κ , GFS model

Введение

Конвективной деятельностью называют любые проявления конвекции в атмосфере: развитие восходящих и нисходящих токов воздуха, облаков и осадков конвекции, гроз, шквалов, смерчей и тромбов, тайфунов или ураганов и т. д. В метеорологии конвекцию разделяют на мелкую и глубокую [2]. Основное отличие глубокой конвекции от мелкой состоит в том, что она развивается в атмосферном слое большой мощности и важную роль в ее развитии играют процессы, связанные с фазовыми переходами влаги в атмосфере. Другая особенность глубокой конвекции состоит в том, что вследствие больших вертикальных и горизонтальных масштабов существенно возрастает влияние горизонтальной неоднородности метеорологических полей синоптического масштаба, эффекта вращения Земли и неоднородности подстилающей поверхности [8].

На сегодняшний день актуален качественный анализ интенсивной разномасштабной конвективной деятельности и связанных с ней опасных явлений погоды (ОЯ), особенно в период активного тайфуногенеза, примерно с июня по ноябрь.

Целью данной работы является исследование особенностей пространственной структуры поля атмосферной конвекции северо-западной части Тихого океана в период сезона тайфунов (включая тропическую зону). Для достижения указанной цели были поставлена и решена следующая задача: разработка методики расчета параметров атмосферной конвекции на основе полных уравнений А.И. Фальковича [7].

В настоящее время различными исследователями разработано изрядное количество методик для определения характеристик конвективной деятельности различной интенсивности в атмосфере. В большинстве случаев такие характеристики представляют собой совокупность нескольких параметров, определяющих конвекцию, при этом эти характеристики часто дублируют друг друга. Одни представлены в расчетах метеорологическими величинами: температурой поверхности океана, температурой и относительной влажностью воздуха, ветром на различных уровнях, осадками и т. д. Другие, такие как доступная конвективная потенциальная энергия (Convective Available Potential Energy, CAPE), индекс плавучести (LI, KO-Index), индекс сдвига ветра в нижнем слое (Low Level Shear, LLS), глубокий слой сдвига (Deep Layer Shear, DLS), индекс Томпсона (Thompson-Index, TI) и др., рассчитываются по термодинамическим уравнениям. Все эти параметры в целом дают обобщенное представление о конвективной деятельности в атмосфере.

Преимуществом выбранной методики по Фальковичу для настоящего исследования, на наш взгляд, является относительная простота расчета одного единственного параметра, в целом характеризующего конвективную деятельность в атмосфере, особенно в тропической, в отличие от других параметров конвекции [7].

В статье предлагается применять методику Фальковича не только для океанической части тропической зоны земного шара (как это

первоначально было предложено данным автором), но и для умеренных и полярных широт, включая поверхность суши.

Ниже в разделе «Метод» описывается предложенная авторами автоматизированная методика расчета показателя, характеризующего разномасштабную конвективную деятельность атмосферы по фактическим и прогностическим данным с заданной заблаговременностью. Реализованный таким образом способ определения конвекции в регионе выгодно отличает настоящую работу от работ, полученных ранее другими российскими и зарубежными авторами, что характеризует практическую новизну настоящего исследования.

Заключительный раздел настоящей статьи посвящен анализу пространственной структуры применительно к различным атмосферным объектам, таким как тайфуны, атмосферные фронты, ячейки облачности. Достоинством предлагаемого метода является возможность для специалиста визуально определять с достаточно большой вероятностью очаги мелкой и глубокой конвекции различной интенсивности на исследуемой территории. Это обстоятельство на сегодняшний день является достаточно актуальным для практического использования.

1. Исходные данные

В настоящей работе использовались данные глобальной прогностической модели Национального управления по исследованию океанов и атмосферы (Global Forecast System of National Oceanic and Atmospheric Administration, GFS NOAA), с шагом сетки $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, которая применяется как в исследовательских, так и в прогностических целях [10].

В работе реализована задача по расчету полей параметра «каппа» (далее в статье данный параметр будет указываться в виде буквы греческого алфавита – κ) современными средствами в узлах заданной широтно-долготной сетки. Выявлены и сопоставлены зоны параметра κ различной интенсивности, которые характеризуют условия и степень развития разномасштабной конвекции в северо-западной части Тихого океана (СЗТО).

Создан блок программ на FORTRAN, korell Shell и в среде GrADS для расчета и представления продукции в цифровом, текстовом и графическом форматах с применением входных данных для расчета из негидростатических моделей семейства WRF, модели ETA и реанализов ERA-INTERIM из Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, JRA25 Японского метеорологического агентства и др.

Расчет поля параметра κ и поля высоты верхнего уровня конвекции происходит полностью в автоматизированном режиме четыре раза в сутки в 00, 06, 12, 18 ч ВСВ.

2. Метод κ -анализ

Термин «метод κ -анализ» подразумевает под собой метод цифрового, текстового и графического представления полей параметра κ в заданном регионе.

Параметр κ – это безразмерный параметр, в целом оценивающий разномасштабную конвективную деятельность в заданном регионе. Параметр κ также называют показателем склонности к конвекции, который рассчитывается на основе термодинамических уравнений, предложенных А.И. Фальковичем [7]. Позднее область применения данного параметра была обобщена и уточнена В.Д. Боханом для так называемого «композиционного» тайфуна [1]. В настоящей работе параметр κ рассчитывается по фактическим данным, без обобщения и уточнения.

Алгоритм расчета начинается с построения для набора заданных пунктов исследуемого региона по данным радиозондирования атмосферы вертикальных профилей эквивалентно-потенциальной температуры для влажного (θ_e) и насыщенного (θ_e^*) воздуха от уровня моря до изобарической поверхности 50 Мб, рассчитанных по формулам (1) и (2):

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{Lr}{C_p T_S}\right), \quad (1)$$

$$\theta_e^* = \theta \exp\left(\frac{Lr^*}{C_p T_S}\right), \quad (2)$$

где θ – потенциальная температура; L – скрытая теплота конденсации; r – отношение смеси при температуре T_S ; C_p – теплоемкость пара при постоянном давлении; T_S – температура уровня конденсации, т. е. уровня, на котором частица, поднимающаяся адиабатически от кривой стратификации, достигает насыщения; r^* – отношение смеси насыщения при температуре влажного воздуха T . Согласно А.И. Фальковичу [7], точно так же, как и θ сохраняется в ненасыщенной частице при ее адиабатическом движении, с точностью, достаточной для практических приложений, θ_e^* сохраняется в насыщенной частице, а θ_e сохраняется в частице до и после насыщения.

Построенные профили θ_e и θ_e^* являются, согласно А.И. Фальковичу [7], эквивалентными характеристиками атмосферы. На их эквивалентность указывали в свое время Малкус и Риль, которые обобщили факт, что эквивалентная потенциальная температура является инвариантом при адиабатическом поднятии частицы при сухом и влажном процессах [12].

Так, если сравнивать профили аэрологической диаграммы с полученными профилями эквивалентно-потенциальной температуры, можно провести некоторую аналогию, где кривая профиля θ_e будет соответствовать кривой стратификации. Так как на любом уровне она однозначно определяет температуру окружения, кривая точки росы – кривой профиля θ_e^* . Уравнение состояния частицы, характеризующее изменение температуры

воздуха в адиабатически поднимающейся частице воздуха и поднимающейся от уровня моря, математически равно const и задается прямой линией на графике.

На рис. 1 представлены вертикальные профили θ_e и θ_e^* , определяющие конвективную неустойчивость атмосферы, а следовательно, указывающие на высокую вероятность развития конвекции. Наглядно показан графический способ определения высот конвективно-неустойчивого слоя (КНС) и запирающего слоя (ЗС) из полученных профилей эквивалентно-потенциальной энергии для влажного и насыщенного воздуха, а также способ нахождения высоты верхнего уровня конвекции.

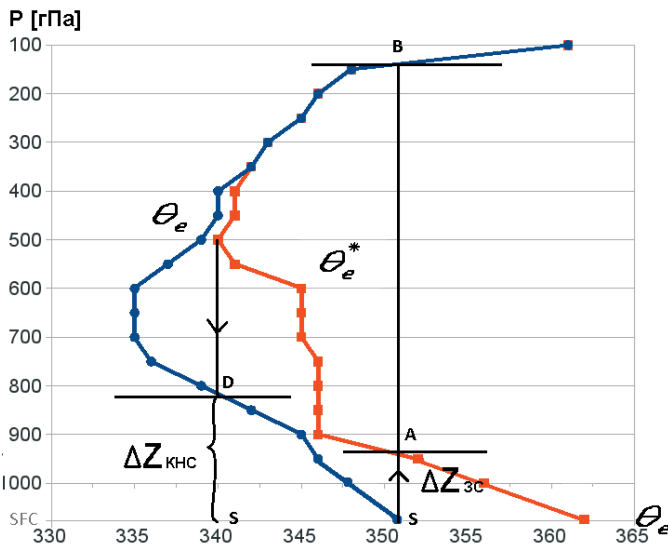


Рис. 1. Вертикальные профили эквивалентно-потенциальной температуры для влажного θ_e и насыщенного θ_e^* воздуха.

Fig. 1. Vertical profiles of equivalent-potential temperature for moist θ_e and saturated θ_e^* air.

По полученным профилям θ_e и θ_e^* определялась мощность конвективно-неустойчивого слоя ($\Delta Z_{\text{КНС}}$) путем поднятия частицы воздуха от уровня моря до высоты КНС (точка D). $\Delta Z_{\text{КНС}}$ определялась путем опускания перпендикуляра от минимального значения в профиле θ_e^* до равного ему значения в профиле θ_e . Мощность запирающего слоя ($\Delta Z_{\text{ЗС}}$) находилась путем поднятия частицы воздуха на графике от уровня моря до момента, пока значения θ_e и θ_e^* станут равны между собой (точка A). Иными словами, слой атмосферы от S до A является запирающим. Но

если частице удастся проникнуть выше ΔZ_{3C} , ее состояние становится неустойчивым, вплоть до точки В, где $\theta_e = \theta_e^*$ и, следовательно, температура частицы будет равна температуре окружения.

Высота верхнего уровня конвекции – высота, на которой прекращается восходящее конвективное движение воздуха. В данной работе она определяется равенством значений θ_e и θ_e^* между собой на достаточно больших высотах (300–100 гПа) и значением θ_e на уровне моря (точка В).

После нахождения в полученных профилях ΔZ_{KHC} и ΔZ_{3C} , по формуле (3) рассчитывалась некая безразмерная величина, характеризующая разномасштабную конвективную деятельность в атмосфере.

Для ее оценки было предложено использовать следующую формулу:

$$\kappa = \frac{\Delta Z_{KHC} - \Delta Z_{3C}}{\Delta Z_{3C}}, \quad (3)$$

где κ – показатель склонности к конвекции А.И. Фальковича.

Параметр κ в настоящей работе рассчитывался по полным уравнениям термодинамики влажной атмосферы, в отличие от работ [4] и др. Это позволило объективно охарактеризовать конвективную деятельность в исследуемом регионе.

Предварительный анализ построенных профилей θ_e и θ_e^* , полученных таким образом значений параметра κ в значимых точках на карте показывает, что области с отсутствием конвекции определены с $\kappa = -1$. Области с мелкой конвекцией выявляются при $-1 \leq \kappa < 1$. В областях с $\kappa > 1$ отмечается глубокая конвекция.

В общем случае имеет место закономерность, заключающаяся в том, что чем больше значение параметра κ , тем интенсивнее будет развиваться конвективная деятельность в атмосфере.

3. Анализ полученных результатов

Результаты настоящей работы представлены в виде визуально оформленных автоматизировано-создаваемых полей параметра κ и приземного давления, а также полей верхнего уровня конвекции в заданном регионе и, в отдельных случаях, радиолокационных карт отражаемости осадков по данным метеорологических радаров JMA.

Согласно проведенному анализу, за длительный период был выявлен ряд некоторых особенностей конвективной деятельности атмосферы в исследуемом регионе. Получено, что конвективные системы в северо-западной части Тихого океана хорошо локализуются, особенно в период прохождения тайфунов. Отображаются различные синоптические ситуации. За исследуемый период в поле параметра κ отмечались зоны, выделенные как области с глубокой конвекцией, мелкой конвекцией

и отсутствием конвекции. Максимальные области с глубокой конвекцией наблюдались преимущественно в юго-западной части циклонов, в то время как области с мелкой конвекцией или отсутствием конвекции – в северо-восточной, что подтверждает результаты исследования других авторов в области атмосферной конвекции. Физическую наглядность построенным картам придают области, где конвективная деятельность не происходит в течение длительного временного периода. Это постоянные центры действия атмосферы: Азиатский антициклон, Северо-Тихоокеанский антициклон и горные системы, такие как Гималаи, Тянь-Шань, Тибет и др. И наоборот, где конвективная деятельность наблюдается практически постоянно либо относительно длительное время – это внутритропическая зона конвергенции (ВЗК), алеутская депрессия, области прохождения циклонов и т. д.

Так, на карте поля параметра χ и поля приземного давления, приведенных на рис. 2, хорошо обозначился тропический циклон (ТЦ) MAYSAK 2015 года. Видна характерная структура тайфуна с хвостовой конвективной полосой и глаз бури (область 1). Обозначена ВЗК (желто-красные цвета – область 2). Также виден отрог Тихоокеанского антициклона (фиолетовый цвет – область 4).

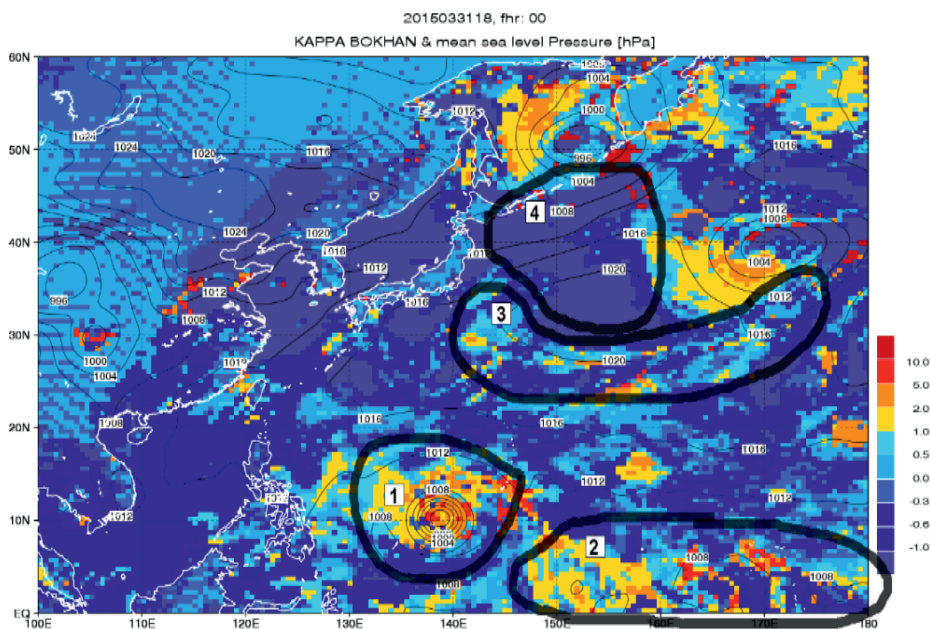


Рис. 2. Карта поля параметра χ и поля приземного давления в северо-западной части Тихого океана.

Fig. 2. Field map parameter χ and the field of sea level pressure in the North-Western Pacific ocean.

На СЗТО в поле параметра χ более детализированно отображается структура фронтов (область 3), которую как на синоптических картах, так и на картах облачности сложно рассмотреть. Ее особенность заключается в последовательном чередовании восходящих и нисходящих конвективных зон [9].

Анализ карт поля параметра χ , полученного на основе оперативных срочных данных, выявил характерный суточный ход конвективной деятельности. Для расчета был взят регион $0-60^\circ$ с. ш., $100-180^\circ$ в. д. в период активного тайфуногенеза с мая по октябрь 2014–2016 гг. Поскольку анализировался в основном ход конвекции над океанической частью СЗТО, в данном исследовании была исключена поверхность суши и расчет производился исключительно над водой. Анализ показывает, что во все месяцы имеется четко выраженный максимум конвекции в 18 ч ВСВ (от 4 до 7 ч утра по региону). При этом процент площади, занятой глубокой конвекцией, колеблется от 5 до 14 %. Максимальный процент отмечался в августе (от 11 до 14 %).

Известно, что средняя (климатологическая) высота уровня конвекции находится на 150–200 гПа (11–14 км). В то же время, согласно [11], для развития глубокой конвекции в регионе одним из условий является наличие мощного конвективного слоя, не менее 7 км в высоту, что соответствует АТ400. В связи с этим можно предположить, что параметр высота верхнего уровня конвекции является некоторым критерием определения северной границы тропической атмосферы. Исходя из этого предположения возможная северная граница тропической атмосферы в СЗТО меняется от сезона к сезону. Так, в зимний период она не поднимается в среднем выше 20° с. ш. С марта по апрель (с начала сезона тайфунов) и до октября–ноября атмосфера, по своим характеристикам и свойствами схожая с тропической атмосферой, простирается вплоть до умеренных широт и в отдельных случаях достигает $43-47^\circ$ с. ш.

На рис. 3. показан пример карты распределения поля верхнего уровня конвекции, рассчитанного по предложенной выше методике, и поля приземного давления в гПа для привязки к синоптическим процессам в атмосфере.

Анализируя построенные карты полей верхнего уровня конвекции и полей параметра χ за длительный период, можно сделать вывод, что тропические циклоны образуются лишь при достаточно мощном конвективном слое, достигающем 7 км и выше в высоту. На практике не было выявлено ни одного случая, когда ТЦ образовывались при высоте верхнего уровня конвекции ниже 7 км. Однако вероятность возникновения ТЦ резко увеличивается при мощности 11 км и выше. В связи с этим можно сделать вывод, что построенная карта имеет наглядное практическое применение и показывает распределение мощности конвективного слоя на различных высотах в исследуемом регионе, а также определяет вероятное положение северной границы тропической атмосферы на момент расчета.

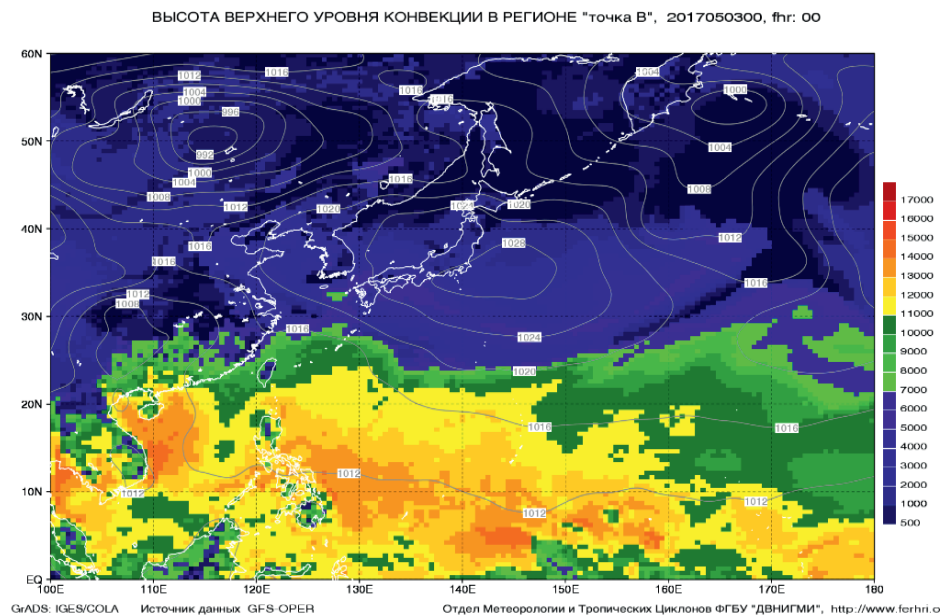


Рис. 3. Распределение поля верхнего уровня конвекции в регионе.
Fig. 3. Distribution of the upper convection field in the region.

Как видно на рис. 3, 3 мая 2017 г. в 00 ч ВСВ вероятная граница тропической атмосферы в СЗТО располагалась вблизи 20° с. ш. Максимальная высота конвективного слоя с очагами, достигающими 15 км и выше, в данный момент времени находилась в районе Южно-Китайского и Филиппинского морей, а также в зоне ВЗК, находящейся около 10° с. ш. восточнее 140° в. д. Минимальная – в районе Берингова моря и постоянного центра действия атмосферы Алеутской депрессии.

Анализ карт распределения полей параметра κ и общего влагосодержания атмосферы W ($\text{кг}/\text{м}^2$) спутникового центра NOAA показал, что значения параметра κ тесно связаны с градицией величины интегрального влагосодержания атмосферы. Значение влагосодержания $50 \text{ кг}/\text{м}^2$ можно считать пороговым для начала глубокой конвекции.

Анализ распределения поля параметра κ и верхнетропосферной дивергенции на уровне тропопаузы показал, что полям с $\kappa > 1$ соответствуют поля дивергенции, $\kappa < 1$ – конвергенции. Верхнетропосферная дивергенция является обязательным условием для развития глубокой конвекции. Данный факт является справедливым лишь для областей примерно $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ в окрестности ТЦ и других крупномасштабных барических образований циклонического типа.

Был проведен дополнительный анализ для получения некоторых динамических связей между дивергенцией на всех стандартных изобарических поверхностях от 1000 до 100 гПа и параметром κ различной

интенсивности. Визуальный анализ показал наличие очагов конвергенции в нижней и средней тропосфере до уровня 650–600 гПа при больших значениях параметра κ в окрестности ТЦ, с максимальными значениями конвергенции на 850–700 гПа и дивергенции на высотах 450 гПа и выше.

В других областях с большими значениями параметра κ данной связи не выявлено. При значениях параметра $\kappa > 1$ очаги дивергенции наблюдались попеременно с очагами конвергенции на высотах от 1000 до 100 гПа. Оценка связи между разноуровневой дивергенцией и глубокой конвекцией в данной работе не проводилась.

Возникали ситуации, когда в исследуемом регионе одновременно существовало два и даже три ТЦ. На картах параметра κ прослеживается взаимодействие ТЦ в поле κ . Однако во всех случаях в поле параметра κ никакого влияния на траекторию друг друга рассматриваемые тропические циклоны не оказывали.

При анализе карт распределения полей вертикальных скоростей ветра на стандартных изобарических поверхностях (1000–100 гПа) и карт с полем параметра κ за три исследуемых года выявлена некоторая закономерность. Так, области с положительными значениями вертикальной скорости достаточно хорошо совпадали с областями параметра $\kappa \geq 1$ на высотах 900–200 гПа, с отрицательными значениями – при $\kappa < 1$. Области вертикальной скорости с максимальными положительными значениями соответствовали областям полей с глубокой конвекцией при $\kappa \geq 1$ в слое 300 гПа.

Выводы

На основании результатов анализа конвективной деятельности атмосферы над северо-западной частью Тихого океана предложенным в статье способом, можно сформулировать основные выводы:

1. По гидрометеорологическим данным глобальной прогностической модели GFS NOAA рассчитаны поля параметра κ , характеризующие конвективную деятельность атмосферы в регионе.

2. Разработан «метод κ -анализ», характеризующий разномасштабную конвективную деятельность в заданном регионе.

3. Поле параметра κ достаточно хорошо показывает различные синоптические ситуации – характерную структуру тайфуна с хвостовой конвективной полосой, глаз бури, отрог Тихоокеанского антициклона, зону ВЗК, зону фронта.

4. Значение влагосодержания 50 кг/м^2 можно считать пороговым для начала глубокой конвекции.

5. В поле параметра κ в исследуемом регионе парные тропические циклоны влияние на изменение траектории друг друга не оказывали.

6. Поле параметра κ позволяет рассмотреть структуру полярного фронта, характеризующуюся попеременно чередующимися восходящими

и нисходящими конвективными зонами. Такую структуру на синоптических картах и картах облачности разглядеть невозможно. Можно предположить, что κ -анализ, первоначально разработанный для тропических широт, в дальнейшем можно будет успешно применять в том числе и для анализа метеополей в умеренных широтах. Привлечение к анализу параметра «верхний уровень конвекции» позволяет детализировать проводимый κ -анализ.

7. Поле параметра «верхний уровень конвекции» показывает пространственное распределение зон с различной толщиной конвективных слоев, а также позволяет определить возможную северную границу тропической атмосферы в исследуемом регионе.

8. Распределения полей вертикальных скоростей ветра на стандартной изобарической поверхности 900 гПа и выше хорошо согласуется с полем параметра κ . При $\kappa < 1$ наблюдалось отрицательное изменение вертикальной скорости ветра, а при $\kappa \geq 1$ – положительное.

Таким образом, применение параметра κ для изучения конвективных систем северо-западной части Тихого океана оправдано и позволяет единообразно и достаточно правдоподобно описывать их известные характерные черты и находить новые.

Благодарности

Авторы выражают особую благодарность с.н.с. ОМТЦ «ДВНИГМИ» Л.И. Евдокимовой за помощь в оформлении рукописи.

Работа выполнена в рамках целевой научно-технической программы «Научно-исследовательские, опытно-конструкторские, технологические и другие работы для государственных нужд в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды».

Список литературы

1. Бохан В.Д. Структура тропической атмосферы на разных стадиях развития тайфуна // Тропическая метеорология: Труды Третьего международного симпозиума. Л.: Госкомгидромет, 1987. С. 164-169.
2. Вельтищев Н.Ф., Жупанов В.Д., Павлюков Ю.Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра, с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF // Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5-18.
3. Динамическая метеорология: Учеб. пособие для вузов / под ред. Д.Л. Лайхтмана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 608 с.
4. Дудник М.Г., Канухина А.Ю., Власов А.А. Расчет индексов конвекции с использованием данных радиозатменного зондирования спутников COSMIC/FORMOSAT // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 20. С. 56-70.
5. Русин И.Н., Тараканов Г.Г. Сверхкраткосрочные прогнозы погоды. СПб.: Из-во РГГМИ, 1996. 308 с.
6. Тараканов Г.Г. Тропическая метеорология: Учеб. пособие для вузов. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 174 с.
7. Фалькович А.И. Динамика и энергетика внутритропической зоны конвергенции. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 23 с.

8. Хромов С.П., Петросьянц М.А. Метеорология и климатология: Учеб. пособие для вузов. М.: Из-во МГУ, 2006. 582 с.
9. Шакина Н.П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 264 с.
10. Global Forecast System (GFS) by NCEP NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
11. Murakami T. Balance model in conditionally unstable tropical atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1972. Vol. 29, no 3. P. 463-487.
12. Riehl H., Malkus J. On the heat balance of equatorial through zone // *Geophysica*. 1958. No. 6. P. 503-538.

References

1. Bokhan V. D. Struktura tropicheskoy atmosfery na raznykh stadiyakh razvitiya tayfuna [The structure of the tropical atmosphere at different stages of typhoon development]. *Tropicheskaya meteorologiya, Trudy tret'ego mezhdunarodnogo simpoziuma*. Leningrad, Goskomgidromet, 1987, pp. 164–169. [in Russ.].
2. Vel'tishchev N.F., Zhupanov V.D., Pavlyukov Yu.B. Short-range forecast of heavy precipitation and strong wind using the convection-allowing WRF models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 36, no. 1, pp. 1-10, DOI: 10.3103/S1068373911010018.
3. Dinamicheskaya meteorologiya Uchebnoe posobiye dlya vuzov. [Dynamic meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1976, p. 608. [in Russ.].
4. Dudnic M.G., Kanukhina A.Yu., Vlasov A.A.. Convection indices derived from COSMIC/FORMOSAT radio occultation sounding data. *Uchenye zapiski RGGU [Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2011, no. 20, pp. 56-70. [in Russ.].
5. Rusin I.N., Tarakanov G.G. Sverkhkratkosrochnyye prognozy pogody [Short-term weather forecasts]. Saint Petersburg, RGGMI publ., 1996, p. 308. [in Russ.].
6. Tarakanov G.G. Tropicheskaya meteorologiya Uchebnoe posobiye dlya vuzov. [Tropical Meteorology] Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, p. 174. [in Russ.].
7. Fal'kovich, A.I. Dinamika i energetika vnutritropicheskoy zony konvergentsii [Dynamics and energy of the intratropical convergence zone]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1979, p. 23 [in Russ.].
8. Khromov S.P., Petrosyants M.A. Meteorologiya i klimatologiya. Uchebnoe posobiye dlya vuzov. [Meteorology and Climatology]. Moscow, MGU publ., 2006, 582 p. [in Russ.].
9. Shakina N.P. Dinamika atmosferykh frontov i tsiklonov [Dynamics of atmospheric fronts and cyclones]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1985, p. 264. [in Russ.].
10. Global Forecast System (GFS) by NCEP NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
11. Murakami T. Balance model in conditionally unstable tropical atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1972, vol. 29, no 3, pp. 463-487.
12. Riehl H. Malkus J. On the heat balance of equatorial through zone. *Geophysica*. 1958, no. 6, pp. 503-538.

Поступила в редакцию 28.11.2018 г.
Received by the editor 28.11.2018.