ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2022, том 58, № 5, с. 534–542

УДК 550.341:551.515

О ВЗАИМНОЙ ДИНАМИКЕ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

© 2022 г. М. И. Ярошевич*

*e-mail: myarosh32@gmail.com

Поступила в редакцию 14.04.2022 г.
После доработки 24.05.2022 г.
Принята к публикации 09.06.2022 г.

Рассматриваются взаимосвязи энергетического характера в динамике циклонической активности тропических циклонов (ТЦ). Выявленные взаимосвязи, представленные регрессионными соотношениями, охватывают диапазон разных масштабов этапов циклонической активности. Установленные взаимосвязи могут служить оперативными оценками прогностического характера в ближайшей динамике циклонической активности.

Ключевые слова: тропические циклоны, циклоническая активность, взаимосвязи этапов циклонической активности

DOI: 10.31857/S0002351522050121

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье приведены основные результаты многолетних исследований тропических циклонов (ТЦ) автором данной статьи. В основу рассмотрения проблемы изначально положено представление об энергетической взаимозависимости между ТЦ в процессе глобального циклогенеза. Исследуется статистика параметров ТЦ с нахождением соответствующих регрессионных соотношений.

Надо отметить, что зачастую явление каждого ТЦ исследуется отдельно [1–6]. Такой подход обусловлен, по меньшей мере, следующими причинами. ТЦ – достаточно сложное и комплексное явление, разумное исследование которого возможно, при упрощении, в частности, с отделением от влияния внешних факторов. К тому же ТЦ представляет собой мощный концентрированный вихрь, легко выделяющийся из окружающей среды. Соответственно, циклоны развивающиеся одновременно или последовательно во времени энергетически нередко полагаются независимыми событиями. Следует отметить, что известны редкие исследования взаимодействия двух одновременно действующих ТЦ. Было установлено, что взаимодействие циклонов носит простой гидродинамический кинематический характер – синхронное вращение вокруг оси, расположенной на линии, соединяющей их центры [7, 8].

ТЦ зарождаются и действуют в открытой системе “океан-атмосфера” с потенциально множеством источников и стоков. Ресурсы системы, благоприятствующие циклонической активности, ограничены. Поэтому предположение о конкуренции за эти ресурсы, а значит и о взаимозависимости одновременно или близких по времени действующих циклонов, кажется, достаточно оправданным. В [9] был приведен ряд аргументов в пользу такого подхода и была предложена нелинейная модель, развивающая идейно близкий подход В.В. Шулейкина [10] и описывающая взаимодействие ТЦ с верхним слоем океана.

Ниже приведен ряд основных результатов анализа циклонической активности, продемонстрировавших энергетические взаимозависимости различных этапов этого сложного и комплексного явления.

Исходной информацией всех расчетных экспериментов служат метеоданные более 2000 ТЦ (депрессий, штормов, тайфунов), произошедших в течение 1945–2015 годов, в северо-западной части Тихого океана (5–45° N и 115–175° E). Данные о ТЦ были взяты из открытого источника: http://weather.unisys.com/hurricane/[1].

2. НЕКОТОРЫЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

1. В первую очередь рассматривалась задача о возможной связи характера уже развитого тропического циклона с его начальной стадией. Наиболее значимым оказалось рассмотрение в качестве “начала” циклона первые его двое суток. При

[1] Прим. ред. В настоящее время ресурс недоступен, данные сохранены на https://web.archive.org/web/20180511082527/http://weather.unisys.com/hurricane/. Надо выбирать данные по годам в столбце West Pacific.

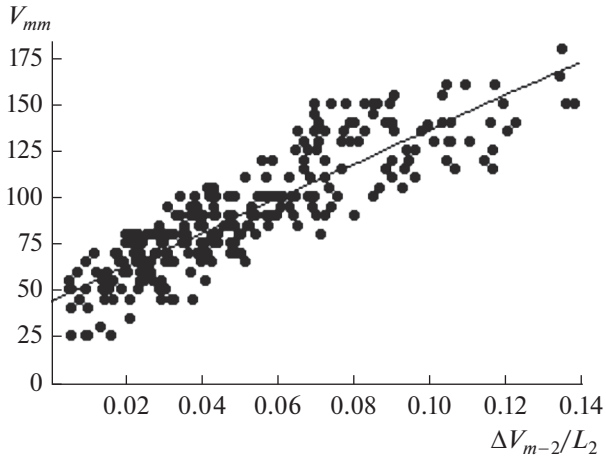

Рис. 1. Зависимость максимальной скорости ветра ТЦ V_{mm} (уз.) и разности скоростей ветра в конце первых двух суток действия циклона ΔV_{m-2} (уз.) к пути, пройденным ТЦ L_2 (км). Регрессионная связь реализуется по соотношению $V_{mm} = 44 + 915\Delta V_{m-2}/L_2$.

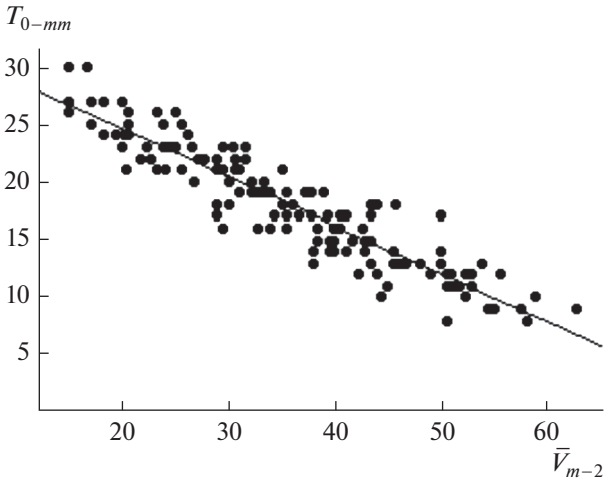

Рис. 2. Зависимость длительности времени от начала циклона до достижения максимальной скорости ветра в циклоне T_{0-mm} от средней скорости ветра в течение первых двух суток действия циклона $\bar{V}_{m-2}$. Зависимость отражена соотношением $T_{0-mm} = 33.6 - 0.44 \cdot \bar{V}_{m-2}$. T_{0-mm} выражено в 6-часовых отрезках времени; ΔV_{m-2} – в узлах.

этом, выбирались тайфуны и сильные штормы с $V_{mm} \geq 50$ узлов (V_{mm} – максимальная скорость ветра в рассматриваемом циклоне) и только те ТЦ, которые по метеосводкам начинались со скорости ветра $V_m \leq 25$ узлов.

Была обнаружена линейная связь между максимальной скоростью ветра ТЦ V_{mm} и отношением разности скоростей ветра в конце первых двух суток действия циклона и в его начале ΔV_{m-2} к пути, пройденным ТЦ за это время L_2 (рис. 1). Регрессионная связь имеет вид: $V_{mm} = 44 + 915\Delta V_{m-2}/L_2$, где скорость берется в узлах, расстояние – в км.

2. Рассматривалась связь времени нарастания циклона T_{0-mm} (время от начала ТЦ до достижения в нем максимальной скорости ветра) со средней скоростью ветра в течение первых двух суток циклона $\bar{V}_{m-2}$. Зависимость на рис. 2 носит линейный характер: $T_{0-mm} = 33.6 - 0.44\bar{V}_{m-2}$. Здесь T_{0-mm} выражено в в 6-часовых отрезках времени; $\bar{V}_{m-2}$ – в узлах.

В [11, 12] было показана также наличие хорошей корреляции между средней скоростью перемещения тайфуна на его нарастающем этапе и средней скоростью его перемещения в его первые двое суток.

Отметим также достаточно убедительную иллюстрацию того, что две важные характеристики циклона V_{mm} и T_{0-mm} задаются, в целом, начальным этапом развития ТЦ. Хотя окружающая среда влияет, безусловно, на развитие циклона, определяющим является его начальное состояние. Оно же, как и основная интенсификация, в свою очередь, определяется условиями, существующими на предыстории при возникновении ТЦ.

3. Отдельно была рассмотрена возможность энергетической взаимосвязи уже между самими циклонами. В периоды высокой циклонической активности, ТЦ чаще всего действуют группами. В этих случаях должна сильнее осуществляться «конкуренция» между циклонами [9] и в связи с этим, вероятно, четче проявятся закономерности возможных взаимосвязей. В наших исследованиях мы в качестве группы рассматриваем хронологический ряд, последовательно, фрагментарно или полностью во времени, совпадающих друг с другом ТЦ. В группу включаются и циклоны, когда, согласно метеосводкам, время между завершением одного циклона и началом последующего циклона не превышает одних суток. Метеосводки о циклонах начинаются и заканчиваются, как правило, при значениях максимальной скорости ветра в V_m = 20–25 узлов. Такие условия соответствуют уже состоянию депрессии. Физически ТЦ начинается раньше, равно как и заканчивается позже даты, указываемой в базах данных. Обозначенный нами здесь разрыв между ТЦ в одни сутки является достаточно условным ограничением. На самом же деле в этих случаях нет временн*о*го интервала между циклонами.

Далее была предпринята попытка в группе одновременно действующих ТЦ найти признак, определяющий общее влияние всех циклонов группы на развитие одного из циклонов этой же группы. Фактически, выявлялась взаимосвязь ТЦ

внутри группы. Здесь в качестве “основных” циклонов, то есть, циклонов относительно которых определяется влияние других циклонов, рассматриваются только тайфуны. В роли же “влияющих” рассматриваются практически все циклоны. В принципе же в настоящем исследовании все группы ТЦ равноправны. Каждый из циклонов может быть и в роли “основного” и в роли “влияющего” циклона.

Интенсивность “влияющих” циклонов может отразиться на различных характеристиках “основного” циклона. В частности, в качестве характеристики «основного» циклона рассматривается среднее значение скорости нарастания квадрата скорости ветра – $F = \left(V_{mm}^2 - V_{m1}^2\right)/\Delta t_{mm-m1}$, в зависимости от “влияющих” ТЦ. Здесь V_{m1} – скорость ветра в начале “основного” циклона, V_{mm} – максимальная скорость ветра “основного” циклона, Δt_{mm-m1} – время между значениями V_{m1} и V_{mm}. (F можно рассматривать в качестве меры среднего значения скорости нарастания кинетической энергии “основного” циклона [13]).

Показателем “влияния” определяется $\sum V_{rij}^2$, в которой V_{rij} – скорость ветра в i-ое время конкретного дня j-го “влияющего” циклона на расстоянии r до конкретных координат “основного” циклона.

Значения V_{rij}^2 определяются из соотношения $V_{rij}^2 = V_{mij}^2 \exp(-\alpha t)^2/r$, где V_{mij} – максимальная скорость ветра j–го “влияющего” циклона в i-ое время, t – время между i-ым временем “влияющего” циклона и временем “основного” циклона, α – коэффициент затухания энергии ветра во времени[2], r – расстояние от “влияющего” циклона до конкретных координат “основного” циклона). Таким образом, $P = \sum V_{rij}^2$ – это сумма значений квадратов скоростей ветра в фиксированные моменты времени всех циклонов, предшествующих “основному” циклону и фрагментарно совпадающих во времени с нарастающим этапом “основного” циклона. Поскольку V_{rij}^2, в целом отражает относительную величину кинетической энергии на фиксированных (6-часовых) интервалах времени, то предполагается, что предложенный показатель “влияния”, определенным образом характеризует энергетически циклоническую ситуацию на рассматриваемой территории в данный момент времени [14].

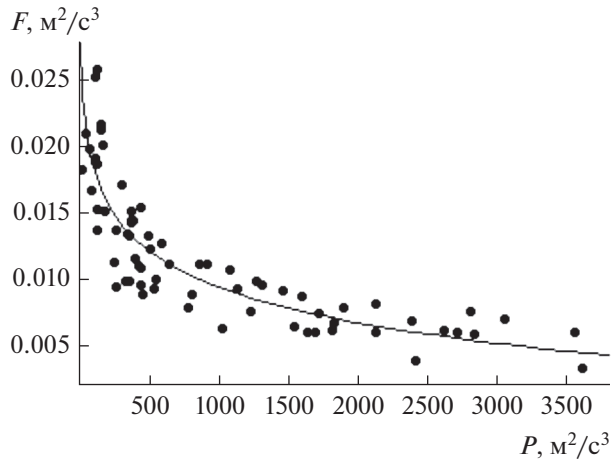

Рис. 3. Зависимость среднего значения ускорения относительной кинетической энергии “основного” циклона F от суммарной относительной кинетической энергии “влияющих” тропических циклонов P Регрессионная кривая соответствует $F = 0.7P^{-0.3}$. Здесь “влияющие” циклоны совпадают по времени целиком или частично со временем нарастающего этапа “основного” циклона.

Зависимость среднего значения ускорения относительной кинетической энергии “основного” циклона F от суммарной относительной кинетической энергии “влияющих” тропических циклонов P, представлена на рис. 3. В роли “основных” циклонов рассматривались тайфуны с $V_{mm} \geq 100$ узлов, а “влияющими”, как уже отмечалось, здесь были все циклоны, фрагменты которых по времени целиком или частично совпадают с нарастающим этапом “основного” циклона. Как видно из рис. 3, с усилением энергетического “веса” “влияющих” циклонов средняя скорость нарастания “основного” циклона падает как $F = 0.7P^{-0.3}$.

Отметим, что схожая с рис. 3 степенная зависимость наблюдается при выборе в качестве “основных” циклонов тайфунов с $V_{mm} \geq 70$. При этом анализе влияние оценивалось не только по совпадающим во времени фрагментам “основного” и “влияющих” циклонов, но и по всем циклонам (фрагментам циклонов), что действовали в пределах 5 суток до начала “основного” циклона. Фактически здесь предполагалось, что влияние определяется всей циклонической обстановкой начиная за 5 суток до начала “основного” циклона и до достижения им значения V_{mm}.

4. Рассмотрим группы ТЦ далее иным образом. Выделяем “основной” циклон, но в данном случае выбираем для этого самый мощный циклон группы. Целью такого рассмотрения был во-

[2] Здесь $\alpha = 3.49 \times 10^{-6}$. В расчете значения α исходили из предположения, что самая высокая скорость циклонического ветра в 180 морских узлов (92.6 м/с) по истечении 15 суток снизится до 1 м/с. Вывод зависимости V_{rij}^2 подробней изложен в [14].

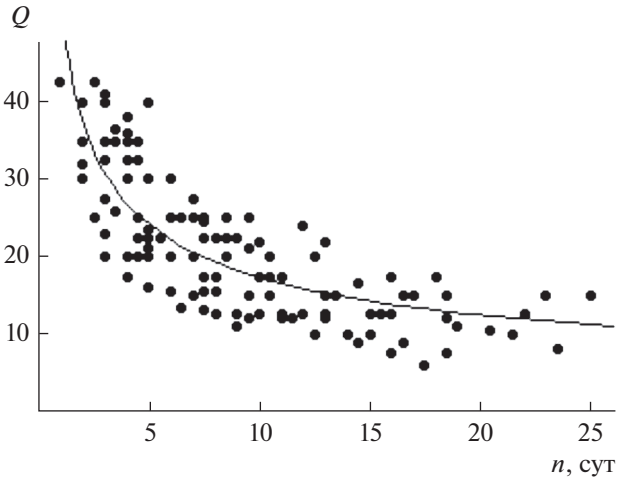

Рис. 4. Скорость ослабления предшествующего тропического циклона $Q = (V_{mm} - V_2)/2$ (уз./сут.) в зависимости от интервала времени n (сут.) между моментами максимальных скоростей ветра предшествующего и основного тропических циклонов группы. V_{mm}, V_2 – соответственно максимальная скорость ветра циклона и скорость его ветра по завершении двух суток. Регрессионная связь выражена соотношением $Q = 51.6\, n^{-0.47}$.

прос о "предчувствии" предшествующими по времени циклонами группы развития в будущем этого "основного" циклона. В качестве "основных" рассматривались циклоны, максимальная скорость ветра которых $V_{mm} \geq 130$ узлов.

Соответственно, определялись скорости ослабления предшествующих циклонов в зависимости от временн***о***го интервала n между моментами максимальных значений скоростей ветра предшествующих циклонов и основного циклона. Среднее значение скорости ослабления циклона должно бы определяться по разности его максимальной скорости ветра и скорости ветра в конце циклона. Однако, в ряде случаев, по метеосводкам, окончание циклона отмечено при скоростях ветра штормового уровня, что, конечно, не может восприниматься в качестве разумной оценки времени окончания циклона. В этой связи ослабление циклона определялось по разности максимальной скорости ветра V_{mm} и скорости ветра спустя двое суток V_2 – $Q = (V_{mm} - V_2)/2$. Многие тропические депрессии и слабые тропические штормы, у которых отмеченное время ослабления менее двух суток, исключались из выборки.

Были проведены обширные расчеты и определены распределения интервалов времени между максимальной скоростью ветра основного циклона и максимальными скоростями ветра предшествующих циклонов [15]. Результаты представлены на рис. 4, где отмечается степенная связь между величинами, оцениваемая как $Q = 51.6\, n^{-0.47}$. Можно сделать вывод, что по мере уменьшения временн***о***го интервала n между моментами максимальных скоростей ветра предшествующего и основного тропических циклонов группы скорость ослабления циклонического ветра предшествующих циклонов усиливается.

Таким образом, отслеживая поток циклонов в реальном времени по последовательной динамике их ослабления, создается возможность, хотя и оценочно, "предчувствовать" возможное приближение времени основного тайфуна группы.

Изложенные в этом разделе результаты, как кажется, довольно убедительно свидетельствуют о существовании энергетических взаимозависимостей ТЦ, действующих в группах. Скорее всего, возможные взаимосвязи между циклонами отнюдь не исчерпываются приведенными зависимостями. В этой связи представляются оправданными исследования как единой сложной структуры группы фрагментарно или полностью совпадающих во времени тропических циклонов.

3. МОДЕЛЬ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ЦИКЛОНОВ

5. Приведенные выше зависимости, наряду с другими результатами схожего характера, указывают на более глубокую взаимную интеграцию ТЦ между собой. Был рассмотрен ряд постановок задач, в которых не удалось получить значимых выводов. Один из таких примеров – получение достоверной оценки энергетической роли в общей динамике циклонической активности каждого из группы ТЦ в часто встречаемых случаях одновременного или почти одновременного их действия. Для определенного разрешения подобных проблем была предложена, довольно простая модель, совместного энергетического представления всех действующих в зоне циклонов в данный момент времени [16, 17].

Кратко изложим суть модели. Основой расчетов является метод оценки кинетической энергии отдельного циклона, которая пропорциональна квадрату скорости ветра [13]. Координаты реальных циклонов, приведенные в метеосводках в 00 ч и 12 ч гринвичского времени рассматриваются в модели в качестве "источников" ветра и центров круговых ветровых полей[3]. Вся зона, где действуют ТЦ, делится на элементарные квадраты размерами в за-

[3] В тропическом циклоне ветровые поля не совсем круглые. Представление их в реальном виде сильно усложнило бы модель и расчеты, в связи, с чем ветровые поля представлялись в виде окружностей.

висимости от решаемой задачи (например, 2° × 2°). В каждое фиксированное время (00 ч и 12 ч) рассматриваются “источники” всех циклонов, действовавших на этот момент времени. По соответствующим каждому “источнику” значениям максимальной скорости ветра V_m и радиусу максимальных ветров r_m, рассчитываются множество значений r и V_r. Величина r – это расстояния от “источника” до центров всех рассматриваемых элементарных квадратов, а V_r – соответствующие скорости ветра в центрах элементарных квадратов. Значения V_r определяются из соотношения $V_r = V_m(r_m/r)^k$ [1, 2]. Здесь $k = 0.5$, как величина, наиболее часто оцениваемая в натурных экспериментах в циклонической зоне северо-западной части Тихого океана [1]. По значениям V_r для каждого элементарного квадрата и от каждого “источника” рассчитывается значение V_r^2, которое здесь условно назовем кинетической энергией. К энергии, рассчитанной для данного момента времени, прибавляется энергия, вычисленная по “источникам” в прошлые моменты времени, естественно, с учетом прошедшего отрезка времени. При этом ослабление энергии во времени оценивается по экспоненте, исходя из примерного времени ослабления реальных циклонов [1, 2]. В каждом элементарном квадрате формируется суперпозиция значений энергии. Сумма суперпозиционных энергий всех элементарных квадратов E_k и характеризует циклоническую активность (циклоническую энергию) на данный момент времени по всей рассматриваемой площади. В итоге годовой поток циклонов, предстает хронологической последовательностью, состоящей из 730 или 732 значений энергии E_k, отражающей общую динамику циклонической активности в течение года. Эта последовательность, приведенная на рис. 5, представляет собой перемежаемые ряды всплесков циклонической активности и циклонического затишья.

Здесь необходимо, как кажется, сделать одно примечание в связи с вышеописанной моделью. ТЦ зарождаются и развиваются при определенных сочетаниях ряда синоптических характеристик среды. Эти характеристики довольно сложно определяются в непрерывном режиме. Нам известны далеко не все факторы определяющие характер ТЦ. В приведенной модели мы абстрагировались от синоптических факторов и возможных неопределенностей, полагая, что они, интегрировано, представлены в скорости циклонического ветра, или в энергии ветра. Следует также отметить, что изменение циклонической активности, определяемое моделью, достаточно

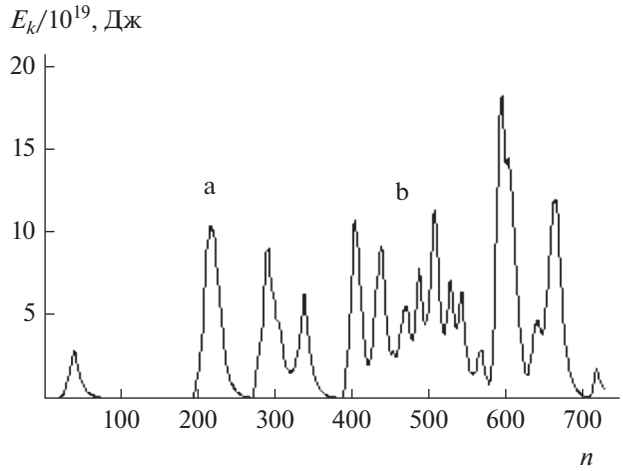

Рис. 5. Пример годовой динамики циклонической активности (2003 г). По вертикальной оси – суммарная кинетическая энергия циклонов, по горизонтальной оси – годовой ряд полусуток. Вертикальный профиль энергии отдельного циклона – (a), вертикальный профиль энергии группы фрагментарно совпадающих во времени циклонов (b). В контуре сложного всплеска (b) каждый “пик” – это обозначение максимальной энергии одного из циклонов группы.

хорошо отражает циклоническую ситуацию с ее динамикой.

6. В ряде расчетных экспериментов исследовалась возможность существования энергетической взаимосвязи между двумя хронологически следующими друг за другом всплесками циклонической активности. Рассмотрим здесь один из результатов – наиболее простой по количеству участвующих параметров и достаточно выразительный по характеру взаимозависимости.

В расчетах участвуют три параметра: $\left(\sum E_k\right)_1$ – суммарная энергия первого по хронологии всплеска циклонической активности, $\left(\sum E_k\right)_2$ – суммарная энергия следующего по хронологии всплеска и отношение энергии второго всплеска к энергии первого всплеска – $\left(\sum E_k\right)_2 / \left(\sum E_k\right)_1$.

Почему здесь рассматривается взаимосвязь $\left(\sum E_k\right)_2 / \left(\sum E_k\right)_1$ и $\left(\sum E_k\right)_1$ а не напрямую взаимосвязь между $\left(\sum E_k\right)_2$ и $\left(\sum E_k\right)_1$? Годовые циклонические активности по ряду параметров сильно между собой различается. Большой всплеск в году относительно слабой циклонической активности может оказаться равным малому или среднему всплеску года большей циклонической активности. В этом случае, выявляя взаимосвязь между $\left(\sum E_k\right)_2$ и $\left(\sum E_k\right)_1$ по годам мы получили бы большой разброс точек с ненадежной закономерно-

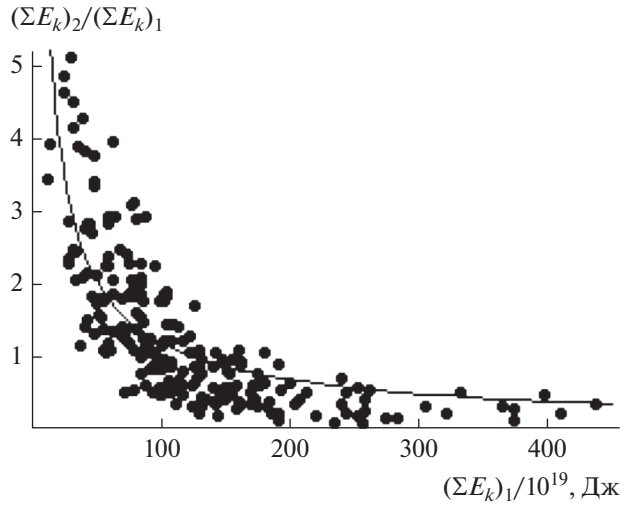

Рис. 6. Зависимость между отношением суммарных энергий последовательных всплесков циклонической активности $(\sum E_k)_2 / (\sum E_k)_1$ к суммарной циклонической энергии предшествующего всплеска $(\sum E_k)_1$. Сплошная линия – степенная аппроксимация $(\sum E_k)_2/(\sum E_k)_1 = 46.15\times(\sum E_k)_1^{-0.79}$.

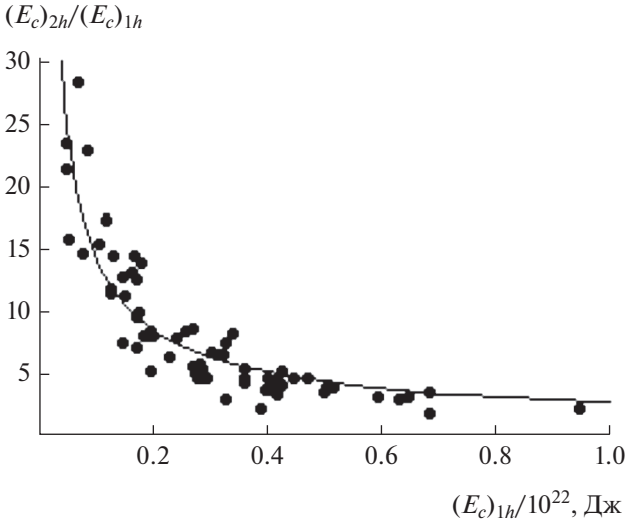

Рис. 7. Зависимость между отношением суммарной энергии 2-е полугодие $(E_c)_{2h}$ к суммарной энергии за 1-е полугодие $(E_c)_{1h}$ к суммарной энергии за 1-е полугодие одного и того же года. Сплошная линия – степенная аппроксимация $(E_c)_{2h}/(E_c)_{1h} = 2.58\times(E_c)_{1h}^{-0.73}$.

стью искомой связи. Исследуя же взаимосвязь $\left(\sum E_k\right)_2/\left(\sum E_k\right)_1$, мы искусственно как бы нормируем сезоны, а стало быть, и всплески. На рис. 6 показан характер этих взаимосвязей, аппроксимируемый степенным регрессионным соотношением $\left(\sum E_k\right)_2/\left(\sum E_k\right)_1 = 46.15\times\left(\sum E_k\right)_1^{-0.79}$.

Соответственно, оценив значение $\left(\sum E_k\right)_1$, мы можем представить примерно суммарное значение энергии следующего – предстоящего всплеска циклонической активности. Главное же в полученном результате – это иллюстрация существования энергетической взаимосвязи между соседними всплесками циклонической активности.

7. Схожие принципы были положены в основу постановки следующего эксперимента. Рассматривалась возможная взаимозависимость суммарных значений циклонической энергии за первое $(E_c)_{1h}$ и второе $(E_c)_{2h}$ полугодия одного и того же года.

Регрессионная связь между $(E_c)_{1h}$ и $(E_c)_{2h}/(E_c)_{1h}$ представлена на рис. 7. Как и в предыдущем исследовании закономерность взаимозависимости гораздо лучше проявилась в представленном относительном соотношении, нежели при попытках выявить связь напрямую между $(E_c)_{1h}$ и $(E_c)_{2h}$. Причины те же, что и при сопоставлении всплесков – значительные различия в годовых значениях циклонической активности. Таким образом, и в данном случае выявлена новая энергетическая взаимосвязь двух крупных по времени этапов циклонической активности.

8. Далее, как показалось, вполне логично рассмотреть возможные межгодовые взаимосвязи циклонических энергий. Иначе говоря, следовало выяснить – влияет ли циклоническая активность текущего года на циклоническую активность следующего за ним года. При этом, сразу, интуитивно исходили из того, что искомую связь следует искать, соотнося энергию конца рассматриваемого года с энергией начала следующего года. Такое решение основывалось на представлении, что физически циклонические процессы в среде, происходящие в период “поздняя осень – зима – ранняя весна”, более связаны между собой, чем, если бы в решаемой задаче сопоставлялись годовые или даже полугодовые энергии. По крайней мере, как казалось, для начала только так можно было выявить последовательную межгодовую связь циклонической активности. В расчетном эксперименте, в частности, исследовалось, возможное, влияние суммарной циклонической энергии за последние сто дней года $\left(\sum E_c\right)_e$, на суммарную энергию первых ста дней последующего года $\left(\sum E_c\right)_b$.

Здесь необходимо вновь обратить внимание на то, что было сказано выше, – значения годовых энергий ощутимо между собой различаются. Поэтому, и в этом случае последовательные сопо-

ставления значений $\left(\sum E_c\right)_e$ и $\left(\sum E_c\right)_b$ приводят к графику с сильным разбросом точек, из которого не просматривается какая-либо закономерность. В целях хотя бы частичного решения этой проблемы здесь под $\left(\sum E_c\right)_e$ и $\left(\sum E_c\right)_b$ рассматривались их относительные значения – деленные на суммарные годовые энергии соответствующего года. Такое своеобразное нормирование, позволило увидеть существование определенной связи между значениями $\left(\sum E_c\right)_b$ от $\left(\sum E_c\right)_e$, представленную на Рис. 8. По соответствующему регрессионному соотношению при изменениях величины $\left(\sum E_c\right)_e$ в пределах 0.1–0.7, что соответствует всему диапазону этих значений, величина $\left(\sum E_c\right)_b$, в среднем, вырастает в 7 раз. Как кажется, закономерность приемлемо четкая.

На рис. 8 наблюдается относительно большой разброс точек. Он объясним, по крайней мере, двумя факторами. Это уровень точности определения скоростей циклонических ветров V_m, приводимых в исходных метеорологических сводках. В расчетных экспериментах, мы воспользовались очень большим количеством этих значений. Второй фактор, возможно, связан с применяемой нами формулой расчетов скоростей ветра на расстояниях – $V_r = V_m\left(r_m/r\right)^k$ [1, 2]. Нами обычно рассматривается значение $k = 0.5$, как наиболее часто выявленная в наблюдениях величина. Однако в [1] отмечается, что на некоторых расстояниях значение "k" может варьировать в пределах от 0.5 до 1. При этом, случаи, когда $0.5 < k < 1$ не оговариваются. К сожалению, других способов более точного определения скорости ветра на удалении от зоны максимальных ветров автору не известны.

С таким же методическим подходом были исследованы и возможные влияния суммарных энергий, определенных для б*о*льших интервалов времени. Тенденция взаимного влияния сохранялась. Однако, с ростом временн***ы***х интервалов, для которых рассчитывается суммарная энергия, степень влияния уменьшается. Последнее как раз и показывает, что не энергия б*о*льшей части предшествующего года влияет на энергию последующего года, а влияет суммарная энергия конца предшествующего года.

Выявленная здесь энергетическая взаимосвязь между хронологически последовательными годовыми циклоническими активностями позволяет, как кажется, достаточно обоснованно рассматривать многолетнюю динамику этой активности как единый непрерывный процесс.

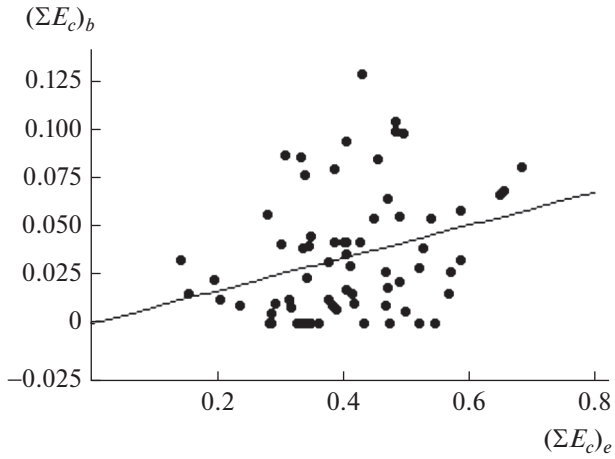

Рис. 8. Зависимость относительной суммарной величины циклонической энергии достигнутой за первые 100 дней текущего года $\left(\sum E_c\right)_b$ от относительной суммарной величины циклонической энергии достигнутой за последние 100 дней хронологически предшествующего года $\left(\sum E_c\right)_e$. Сплошная линия – регрессионная зависимость $\left(\sum E_c\right)_b = -0.0002 + 0.085 \cdot \left(\sum E_c\right)_e$.

Рассмотрим допущение феноменологического характера. В зоне действия тропических циклонов в открытой системе "атмосфера-океан" непрерывно во времени и в пространстве изменяются значения физических характеристик, в комплексе определяющие характер тропического циклона. При определенном уровне значений и совместимости этих характеристик "система" сбрасывает порцию энергии в форме тропического циклона. Но и после этого процесс непрерывного изменения значений характеристик не прерывается и длится до формирования следующего циклона или группы в той или иной мере совпадающих по времени циклонов. И так – непрерывно по всей многолетней последовательности циклонической активности. Предложенное допущение представляется физически достаточно реалистичным.

Особое место в динамике циклонической активности занимают всплески этой активности (рис. 5). Всплески между собой очень различаются по целому ряду, характеризующих их параметров. В проведенных нами довольно многочисленных расчетных экспериментах выявлены разнообразные и важные связи между параметрами хронологически последовательных всплесков. По сути, основные характеристики всплеска определяются параметрами предшествующего всплеска и частично характеристиками затишья циклонической активности между рассматриваемыми всплесками. Внешний вид всплесков и особенно их взаимосвязи позволяют, как кажется, деталь-

ней и тоньше понимать разнообразие возможностей среды в части “взбросов” циклонической энергии. Это представляется достаточно важным.

Результаты этих исследований всплесков здесь не приведены, так как работы еще продолжаются и это уже несколько иная тема.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты иллюстрируют непрерывную иерархическую линию энергетических взаимозависимостей: параметров внутри отдельного тропического циклона, между близкими по времени циклонами и между разномасштабными этапами многолетней динамики циклонической активности интегрированной по всей рассматриваемой циклонической зоне. Таким образом, предполагается возможность в исследованиях рассматривать многолетнюю динамику циклонической активности, как единый непрерывный процесс.

Используемые здесь подходы позволяют, как нам кажется, разнообразнее и детальнее выявлять и изучать возможности окружающей среды в формировании циклонической активности.

Полученные регрессионные соотношения могут служить, своего рода, оценками прогноза ближайшего развития циклонической активности.

Представленные нами методы исследований динамики тропических циклонов и динамики циклонической активности при их дальнейшем развитии представляются достаточно эффективными при рассмотрении тропических циклонов как коллективного явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хаин А.П., Сутырин Г.Г.* Тропические циклоны и их взаимодействие с океаном. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 272 с.
2. *Gray W.M.* Recent advances in tropical cyclone research from rawinsonde composite analysis. Fort Collins (Color.). Dep. Atm. Sci., Colo. State Univ., 1981. 407 p.
3. *Иванов В.Н., Пудов В.Д.* Структура термического следа тайфуна Тесс в океане и оценка некоторых параметров энергообмена при штормовых условиях. В кн. Тайфун – 75. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 66–82.
4. *Frank W.M.* The structure and energetics of the tropical cyclone. Atm. Sci.Paper № 258. 1976. Colorado. St. Univ. 180 p.
5. *Colomb A., Kriat T., Leroux M.-D.* On the Rapid Weakening of Very Intense Tropical Cyclone Hellen (2014) // Monthly Weather Review. 2019. V.147. № 8. P. 2717–2737. https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0309.1
6. *Hoover B.T., Velden C.S.* Adjoint-Derived Impact of Assimilated Observations on Tropical Cyclone Intensity Forecasts of Hurricane Joaquin (2015) and Hurricane Matthew (2016) // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2020. V. 37. № 8. P. 1333–1352. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-20-0006.1
7. *Ситников И.Г., Похил А.Э.* Взаимодействие тропических циклонов между собой ис другими барическими образованиями (ч. I, обзорная статья) // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 30–38.
8. *Ситников И.Г., Похил А.Э.* Взаимодействие тропических циклонов между собой ис другими барическими образованиями (ч. II, обзорная статья) // Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 36–50.
9. *Ярошевич М.И., Ингель Л.Х.* Тропический циклон как элемент системы океан – атмосфера // Доклады Академии Наук. 2004. Т. 399. № 3. С. 397–400.
10. *Шулейкин В.В.* Расчет развития, движения и затухания тропических ураганов и главных волн, создаваемых ураганами. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. с. 97.
11. *Ярошевич М.И.* Зависимость интенсивности тропического циклона от динамики скорости ветра на начальном этапе его развития // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 2. С. 251–254.
12. *Ярошевич М.И.* Иерархия взаимосвязей в динамике циклонической активности тропических циклонов // Исследование Земли из Космоса. 2017. № 6. С. 65–74.
13. *Голицын Г.С.* Статистика и энергетика тропических циклонов // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354. № 4. С. 535–538.
14. *Ярошевич М.И.* Энергетический признак взаимовлияния группы частично совпадающих во времени тропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 575—578.
15. *Ярошевич М.И.* Об одной особенности динамики интенсивностей тропических циклонов, действующих группой // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 4. С. 45–48.
16. *Ярошевич М.И.* Динамика сезонных значений суммарных интенсивностей тропических циклонов // Доклады Академии Наук. 2007. Т. 413. № 4. С. 549–552.
17. *Ярошевич М.И.* О некоторых взаимосвязях в динамике активности тропических циклонов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 547–551.
18. *Ярошевич М.И.* Циклоническая активность тропических циклонов и ее динамика – единый непрерывный процесс // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 5. С. 547–550.

On the Mutual Dynamics of Tropical Cyclones

M. I. Yaroshevich*

**e-mail: myarosh32@gmail.com*

The relations of energy character in the dynamics of cyclonic activity of tropical cyclones (TC) are considered. The relationships revealed, represented by regression relations, cover a range of different scales of cyclonic activity stages. The relationships revealed can serve as operational estimates of the prognostic character in the nearest dynamics of cyclonic activity.

Keywords: Tropical cyclones, cyclonic activity, relationships between the stages of cyclonic activity