

УДК 550.341:551.515

## О СВЯЗИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРА В ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНАХ И АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

© 2019 г. А. А. Макоско<sup>1,2\*</sup>, Е. В. Набокова<sup>3\*\*</sup>, М. И. Ярошевич<sup>\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, Москва, Пыжевский пер., 3

<sup>2</sup>Межведомственный центр аналитических исследований при президиуме РАН  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65, стр. 6

<sup>3</sup>Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации  
123242, Москва, Большой Предтеченский пер., 9-13

E-mail: \*aam@pran.ru, \*\*e.nabokova@gmail.com, \*\*\*myarosh32@gmail.com

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

Принята к печати 07.08.2019 г.

Установлено существование связей между кинематическими характеристиками ветра (максимальная скорость и его ускорение) в тропическом циклоне и значениями аномалий силы тяжести (вертикальной и горизонтальных составляющих, соответственно ВАСТ и ГАСТ) вдоль траекторий перемещения тропических циклонов. Показано, что изменения ВАСТ и скорости ветра в целом близки в противофазе и, в определенной мере, качественно коррелируют. Анализ ускорений ветра и соответствующих значений ВАСТ не выявил четкого соответствия в их сопоставлении. Изменения значений ГАСТ близки к изменениям скорости ветра и на качественном уровне они хорошо коррелируют за исключением выхода ТЦ на сушу и перемещения ТЦ по высокоаномальному району. Сопоставление изменений максимальной скорости и ускорения ветра с изменениями значений ГАСТ выполнено впервые.

**Ключевые слова:** тропические циклоны, вертикальная и горизонтальные составляющие аномалии силы тяжести, максимальная скорость ветра, ускорение максимальной скорости ветра.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002-3515556139-146>

### ВВЕДЕНИЕ

По меньшей мере с 1970-х гг. в метеорологической литературе периодически высказывались предположения о возможности влияния аномалий силы тяжести (АСТ<sup>1</sup>) на некоторые атмосферные процессы [1–3]. Основное внимание было уделено тому, что относительно большим территориям, характеризующимся в среднем как зоны отрицательных АСТ, присуща циклониче-

ская активность и, наоборот, над областями, где преобладают положительные АСТ, чаще формируется антициклоническая ситуация. Эти исследования не получили должного развития, на наш взгляд, вследствие недостаточной точности данных об АСТ.

В монографии [4] указывалось на соблюдение осторожности в выборе подходящей системы координат при гидродинамическом моделировании атмосферы и было предложено использовать сферические координаты для корректного учета влияния силы тяжести. Однако полученная в этих координатах форма уравнений гидродинамики не учитывала влияние АСТ.

«Параметры ...» [5], в которых была опубликована модель гравитационного поля Земли на основе разложения в ряд по сферическим функциям до 360 порядка, что соответствует представлению АСТ по трапециям  $5^\circ \times 5^\circ$ , стимулировали появление ряда работ по исследованию

<sup>1</sup> АСТ обусловлены (в порядке убывания степени влияния) центробежной силой, сплюснутостью Земли, аномалиями расположения масс внутри Земли, приливными явлениями в гидро- и атмосфере, перераспределениями воздушных масс и др. Учет первых двух факторов обеспечивается выбором подходящей системы отсчета, например, декартовой, связанной с ОЗЭ. Принимая во внимание, что влияние аномальных масс на три порядка превышает влияние оставшихся факторов, следует считать, что АСТ обусловлены гравитационными аномалиями Земли.

влияния АСТ на атмосферные процессы, в частности [6–8]. Впоследствии в работах [9, 10] был разработан алгоритм комбинированного вычисления составляющих АСТ с использованием моделей, основанных на широком привлечении спутниковых данных, разложениях в ряды сферических функций, рациональном учете влияния дальней зоны. Построенная модель предназначена для задач математического моделирования атмосферы Земли и обеспечивает представление АСТ по трапециям  $5' \times 5'$ , что соответствует разложению в ряд сферических функций до 2160 порядка.

Результаты работ [7, 8] и возможность использования данных высокоточной модели АСТ в значительной мере инициировали статистический анализ, относящийся к возможному влиянию АСТ на тропические циклоны (ТЦ). По объективным условиям технического характера особенности динамики ТЦ исследовались ранее только в поле вертикальных составляющих аномалий силы тяжести (ВАСТ).

В целом все результаты исследований указывали на формальную связь между рядом параметров ТЦ и ВАСТ. Так в работах [11–15] выявлено, что для двух равных площадей зоны зарождения ТЦ, находящихся в одинаковых благоприятствующих циклонической активности условиях, число зарождений циклонов было значительно выше на площади с существенно меньшим средним значением ВАСТ. Аналогичный результат был получен и в зонах, где ТЦ достигают своих максимальных скоростей ветра: повторяемость максимальных ветров и средние значения ВАСТ формально также связаны обратной зависимостью [11]. Здесь же было показано, что и длительность ТЦ формально аналогично связана со средним значением ВАСТ, рассчитанным по всей траектории циклона. В [14] показано, что среднее значение скорости максимальных скоростей ветра циклона было тем выше, чем меньше было среднее значение ВАСТ по этому циклону. В [15] исследована зависимость средней скорости перемещения ТЦ от значений ВАСТ в зоне действия циклона. Рассматривались циклоны северо-западной части Тихого океана и западной Атлантики. Выявлена с довольно высокой степенью корреляции обратная зависимость средней скорости перемещения циклона от значений ВАСТ.

Из кратко перечисленных результатов следует, что ряд важнейших параметров ТЦ формально связаны, по крайней мере, с ВАСТ обратной регрессионной зависимостью.

По полученным результатам высказано предположение, что ВАСТ могут рассматриваться в качестве дополнительного фактора, в определенной мере влияющего на интенсивность тропических циклонов.

Важно подчеркнуть, что исследования возможных связей характеристик ТЦ и горизонтальных составляющих аномалий силы тяжести (ГАСТ) до сих пор не проводилось. В настоящей статье представлены результаты первого исследования возможных связей характеристик ТЦ и ГАСТ. При этом рассматривается и влияние ВАСТ, что позволяет в целом более комплексно сопоставить характеристики ТЦ и АСТ.

### ЦЕЛЬ, МЕТОДЫ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью проведенных исследований было сопоставление изменений кинематических характеристик (максимальной скорости и ускорения) ветра в ТЦ с пространственным изменением ВАСТ и ГАСТ. Для удобства в ГАСТ выделялись зональная и меридиональная составляющие (соответственно, ЗГАСТ и МГАСТ).

Этим исследованиям присущи сложности, свойственные исследованиям других природных явлений: невозможно, как в физическом эксперименте, создать условия с АСТ и без них. Поэтому, в выполненных исследованиях использованы опосредованные методы и, в частности, сопоставление и анализ соответствующих характеристик.

В качестве исходных данных использовались источники ([Weather.unisys.com/hurricane/atlantic/year/](http://Weather.unisys.com/hurricane/atlantic/year/), Unisys Weather year Hurricane-Tropical Data for Western Pacific), в которых о каждом ТЦ представлены географические координаты его центра и скорость максимальных ветров в 00, 06, 12 и в 18 ч Гринвичского времени в течение жизненного цикла циклона.

Составляющие АСТ были рассчитаны с помощью модели составляющих силы тяжести, специально построенной для задач математического моделирования атмосферы [7, 8].

Для характеристики интенсивности ТЦ выбраны две характеристики: максимальная скорость ветра  $V$  и ускорение ветра  $A$ . Скорость  $V$  извлекалась из вышеуказанных источников, а ускорение ветра определялось с помощью приближенного соотношения:

$$A \approx (V(t_0 + \Delta t) - V(t_0))/\Delta t,$$

где  $t_0$  — момент времени,  $\Delta t = 6$  ч.

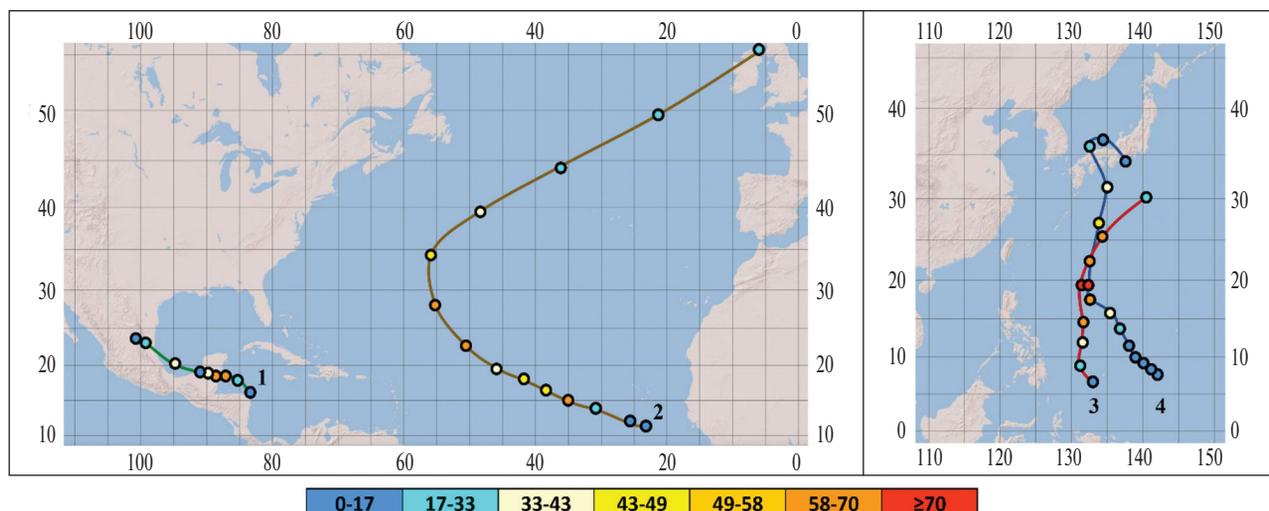


Рис. 1. Траектории и максимальные скорости (м/с) ТЦ «Keith» (1), «Isaac» (2), «Rammasun» (3), «№ 10» («Scott») (4).

Объекты исследования (рис. 1):

- 1 — ураган «Keith» (западная Атлантика, 2000 г.);
- 2 — ураган «Isaac» (западная Атлантика, 2000 г.);
- 3 — тайфун «Rammasun» (северо-западная часть Тихого океана, 2008 г.);
- 4 — тайфун «№ 10» («Scott») (северо-западная часть Тихого океана, 1997 г.).

Выбор этих ТЦ для исследований был продиктован, прежде всего тем, что их траектории расположены в зонах высокой циклонической активности северо-западной части Атлантики и северо-западной части Тихого океана. Следующее условие выбора заключалось в существенном различии траекторий ТЦ «Keith», «Isaac», «Rammasun». Наконец, ТЦ «Rammasun» и «Scott», зародившись на расстоянии друг от друга порядка 1000 км, перемещались преимущественно с юга на север по относительно близкой траектории. Эти обстоятельства должны позволить выявить особенности влияния АСТ на максимальную скорость и ускорение ТЦ.

Для выбранных ТЦ в конкретных точках их траекторий сопоставлялись максимальные скорости ветра в них и ускорения этих скоростей со значениями ВАСТ, ЗГАСТ и МГАСТ. В итоге это позволило сопоставить кинематические характеристики ветра в ТЦ и АСТ и провести анализ этого сопоставления.

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА АСТ

На рис. 2 представлены графики изменения составляющих АСТ по траектории движения каждого из исследуемых четырех ТЦ. Графики иллюстрируют принципиальное различие из-

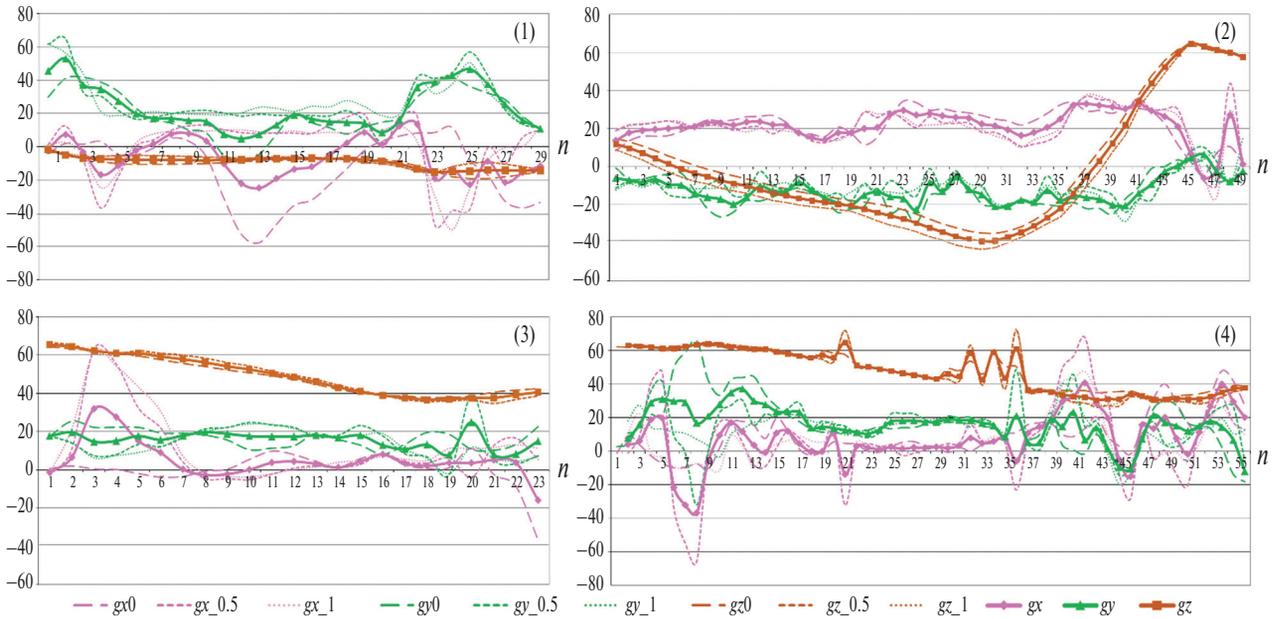
менения ВАСТ и ГАСТ как по их характеру, так и по уровню значений аномалий.

Видно, что перемещение ТЦ проходит как по низко, так и по высокоаномальным районам. Об этом свидетельствуют амплитуды составляющих АСТ. При этом графики ГАСТ более пестрые, чем ВАСТ, амплитуды которых достаточно гладкие.

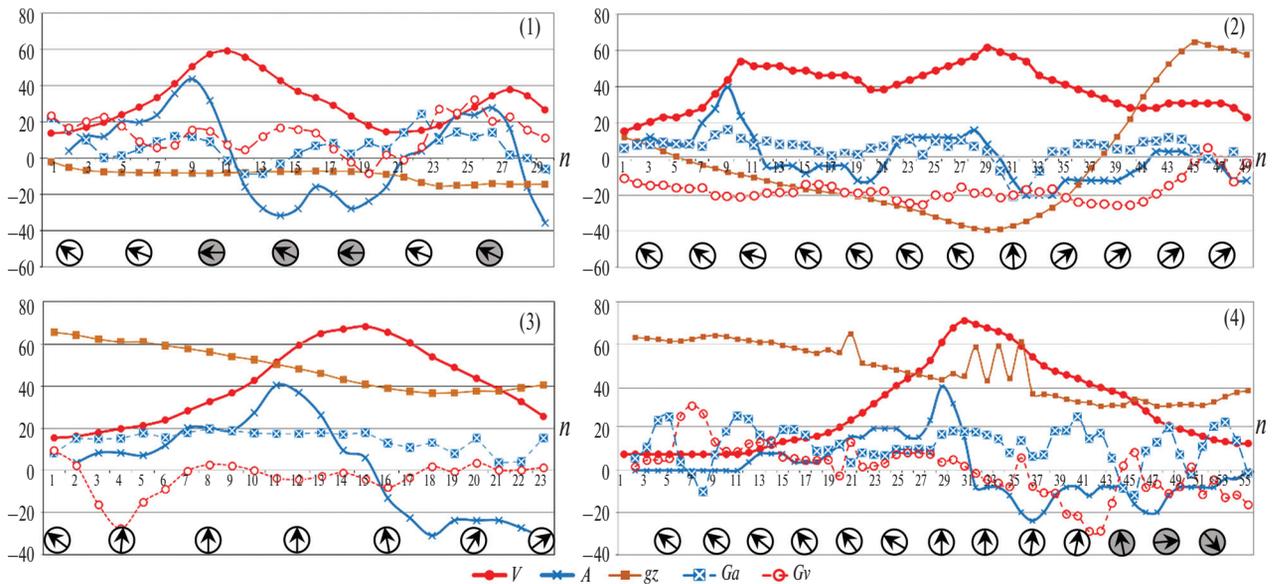
Значения каждой из составляющих АСТ в точках траекторий ТЦ рассчитывались в трех вариантах:

- а) в узле сетки модели АСТ, ближайшем к точке траектории ТЦ;
- б) в результате осреднения в круге радиусом  $0.5^\circ$ ;
- в) в результате осреднения в круге радиусом  $1^\circ$ .

Осреднение представляется важной процедурой для адекватного представления АСТ. Для ВАСТ осреднение в круге радиусом  $0.5^\circ$  или  $1^\circ$  по сравнению с ее значением в ближайшей точке (вариант (а)) сказывается слабо, а между вариантами (б) и (в) практически нет различий. Для ГАСТ видны различия между вариантами (б) и (в) порядка 10 мГал, а по сравнению с вариантом (а) различия особенно существенны в высокоаномальных районах (до 70–90 мГал). Заметим, что в варианте (б) средние значения рассчитываются примерно по 100–110 значениям АСТ, расположенным в круге радиуса  $0.5^\circ$  ( $0.5^\circ$  — это довольно характерное расстояние до зоны максимальных ветров в ТЦ). В варианте (в) расчет проводился примерно по 400 значениям АСТ. По-видимому, для адекватного представления значения ГАСТ необходимо применять специальные процедуры осреднения [6], но рациональный их выбор выходит за рамки



**Рис. 2.** Изменения АСТ (мГал) по траекториям ТЦ «Keith» (1), «Isaac» (2), «Rammasun» (3), «№10» («Scott») (4). Обозначения:  $n$  — порядковый номер точки вдоль каждой траектории (через каждые 6 ч.);  $gz, gx, gy$  — соответственно ВАСТ, ЗГАСТ и МГАСТ; индекс «0» означает, что составляющая АСТ взята в точке, ближайшей к точке траектории ТЦ, индекс «0.5» — осреднение в круге радиусом 0.5°; индекс «1» — осреднение в круге радиусом 1°; без индекса — полусумма составляющей с индексом «0» и составляющей с индексом «0.5».



**Рис. 3.** Изменения максимальной скорости ( $V$ , м/с), ускорения ( $A$ ,  $10^{-5} \cdot \text{м/с}^2$ ), ВАСТ ( $gz$ , мГал), аналоги ГАСТ ( $Ga$  и  $Gv$ , мГал) вдоль траекторий ТЦ. Стрелки в кружках указывают направление перемещения ТЦ. Белый цвет заливки кружка указывает на перемещение ТЦ над океаном, а серый цвет — на перемещение над сушей. Остальные обозначения приведены на рис. 2.

данной работы. В связи с этим для сопоставления с кинематическими характеристиками ветра в ТЦ использовалась полусумма составляющих АСТ, полученных для вариантов (а) и (б).

Также обратим внимание на то, что траектории ТЦ «Keith» и «№ 10» («Scott») проходят не только по зоне океана (кружки со стрелками белые), но пересекают участки суши и прибрежных районов (кружки со стрелками серые) (рис. 3).

**РАСЧЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ:  
СОПОСТАВЛЕНИЕ  $V, A$  С ВАСТ**

Анализ изменений максимальных скоростей ветра и соответствующих им значений ВАСТ для выбранных четырех ТЦ (рис. 2) показывает следующее.

ТЦ «Keith» начинается в Карибском море, пересекает Мексиканский полуостров, прохо-

дит южнее Юкатанского пролива, далее следует по Мексиканскому заливу и завершается на территории Мексики. Изменения ВАСТ и скорости  $V$  близки в противофазе и, в определенной мере, они качественно коррелируют. Влияние суши (серые кружки на графиках рис. 2), по-видимому, привело к заметному снижению максимальной скорости.

ТЦ «Isaac» полностью развивается в океане, то есть, в отличие от циклона «Keith» не пересекает участков суши. Качественно явно проявляется отрицательная корреляция между изменениями скорости ветра и значений ВАСТ.

Для ТЦ «Rammasun» изменения ВАСТ также находятся в противофазе с изменением скорости ветра. Циклон в середине своего развития приблизился к восточным побережьям Филиппинских островов, но будучи энергетически сильным не «среагировал» на относительную близость суши и возможные изменения глубины океана.

ТЦ № 10 («Scott») также перемещается по океану, восточнее Филиппинских островов и, по сути, завершается на южной территории Японии. При приближении к Японии циклон пересекает участок ВАСТ с повышенными градиентами (точки траектории 21 и с 29 по 37). По-видимому, это проявление влияния тектонического разлома, пересекающего этот участок. Несмотря на это изменение ВАСТ находится в противофазе с изменением скорости ветра. Влияние суши (серые кружки на графиках рис. 2), по-видимому, приводит к ускорению снижения максимальной скорости ветра.

Анализ ускорения  $A$  и соответствующих ему значений ВАСТ для выбранных четырех ТЦ (рис. 2) не выявил четкого соответствия в их сопоставлении.

#### НЕКОТОРЫЕ АРГУМЕНТЫ ПО ОБОСНОВАНИЮ ВОЗМОЖНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДИНАМИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТЦ ОТ ГАСТ

При анализе зависимости перемещения ТЦ от ГАСТ имеет место неопределенность, связанная с необходимостью одновременного учета ЗГАСТ и МГАСТ. Для ее устранения выполним анализ уравнений движения, учитывающих АСТ. С этой целью воспользуемся теоретическими результатами работ [6–8].

В простейшем случае уравнения горизонтального движения с учетом влияния АСТ имеют вид [6, 7]

$$\frac{d\vec{C}}{dt} + l\vec{k} \times \vec{C} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (1)$$

где  $\vec{C} = u\vec{i} + v\vec{j}$  — вектор горизонтальной скорости ветра;  $\vec{g} = g_x\vec{i} + g_y\vec{j}$  — вектор ГАСТ;  $l$  — параметр Кориолиса;  $\rho$  — плотность;  $P$  — давление;  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — орты, направленные вдоль осей  $x, y, z$ .

Из уравнения (1) видно, что локальное ускорение скорости горизонтального движения пропорционально ГАСТ:  $\frac{\partial \vec{C}}{\partial t} \sim \vec{g}$  или в покомпонентном виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} \sim g_x, \quad \frac{\partial v}{\partial t} \sim g_y.$$

Полученные соотношения указывают на то, что влияние ЗГАСТ и МГАСТ необходимо учитывать в зависимости от направления движения ТЦ. В первом приближении для сопоставления ускорения скорости горизонтального движения и ГАСТ может быть применено качественное установление наличия корреляции

$$\text{cor}(A, G_a), \quad (2)$$

где  $A = \left| \frac{\partial \vec{C}}{\partial t} \right|$  — модуль ускорения;  $G_a = |\cos b| g_x + |\sin b| g_y$ ;  $b$  — угол, образованный направлением перемещения ТЦ с осью  $x$  и отсчитываемый против часовой стрелки.

Решая уравнение (1) относительно скорости при параметре Кориолиса, получаем

$$\vec{C} = -\frac{1}{l} \frac{d\vec{C}}{dt} \times \vec{k} - \frac{1}{l\rho} \nabla P \times \vec{k} + \frac{1}{l} \vec{g} \times \vec{k}.$$

Здесь первое слагаемое есть эволюционная составляющая вектора скорости  $\vec{V}$ , второе — геострофическая, а третье — гравитационная, компоненты которой есть:

$$u_x = \frac{1}{l} g_y, \quad v_y = -\frac{1}{l} g_x. \quad (3)$$

Отсюда видно, что тангенциальные составляющие АСТ могут влиять на скорость движения атмосферы. При этом МГАСТ — на зональную составляющую скорости ветра, а ЗГАСТ — на меридиональную. Однако, если учесть характерные значения  $g_x, g_y$  то видно, что вклад гравитационных компонент в величину скорости ветра невелик, но, очевидно, они могут рассматриваться в качестве дополнительного фактора, влияющего на динамику ТЦ.

Полученные соотношения (3) указывают, что сопоставление скорости горизонтального дви-

жения и ГАСТ может быть осуществлено примерно также, как в случае с ускорением. Но при этом нужно учитывать знак «минус» во втором выражении в (3). С учетом этого обстоятельства может быть применено качественное установление наличия корреляции

$$\text{cor}(V, G_V), \quad (4)$$

где  $V = |\vec{C}|$  — модуль максимальной скорости;  $G_V = |\cos b|g_y + |\sin b|(-g_x)$ .

#### РАСЧЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ: СОПОСТАВЛЕНИЕ $V$ И $A$ С ГАСТ

При сопоставлении изменений максимальных скоростей ветра и их ускорений с соответствующими им значениями ЗГАСТ и МГАСТ для выбранных четырех ТЦ учитывается, как было указано выше, направление перемещения последних (стрелки в кружках на рис. 2), чтобы воспользоваться соотношениями (3) и (4).

Из рис. 3.1 следует, что для ТЦ «Keith» изменения значений  $G_V$  близки к изменению скорости  $V$  и на качественном уровне они хорошо коррелируют за исключением выхода ТЦ на сушу (точки траектории 10–12). По-видимому, влияние суши здесь доминирует над другими факторами. Значения  $G_a$  коррелирует с ускорениями  $A$  визуально еще сильнее. При этом влияние суши незаметно.

Для ТЦ «Isaac» (рис. 3.2) изменение значений  $G_V$  по сравнению с ТЦ «Keith» качественно слабее коррелирует с изменением скорости  $V$ . При этом в начале траектории (точки 1–8) и в ее конце (точки 40–46 и 49) изменения  $G_V$  и  $V$  находятся в противофазе и качественно коррелируют. Значения  $G_a$  коррелируют с ускорениями  $A$  весьма неплохо.

Для тайфуна «Rammasun» (рис. 3.3) изменения  $G_V$  и изменения скорости  $V$  в точках 4–8, 12–14 хорошо коррелируют. В начале траектории (точки 1–4) и затем в точках 8–12 также наблюдается качественно хорошая корреляция и соответствующие изменения находятся в противофазе. Далее по траектории движения ТЦ однозначного соответствия значений  $G_V$  и скорости ветра не наблюдается. Возможно здесь сказались относительная близость суши и возможные изменения глубины океана. Изменения значений  $G_a$  с изменением ускорения  $A$  в целом коррелирует слабо.

С началом усиления ТЦ № 10 («Scott») (рис. 3.4) заметно хорошее соответствие измене-

ний  $G_V$  и  $V$ . Исключения составляют точки траектории 21 и с 29 по 37, в которых, по-видимому, значительно влияние тектонического разлома, а также точки 43–46 и 49–53, где ТЦ вышел на сушу.

После начала усиления ТЦ (с точки траектории 13) изменения  $G_a$  коррелируют с изменением ускорения  $A$  весьма неплохо до выхода циклона на сушу.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Итоги проведенных расчетов для четырех ТЦ, траектории которых значительно различались, позволяют заключить следующее.

Изменения значений ВАСТ и скорости  $V$  в целом близки в противофазе и, в определенной мере, качественно коррелируют. Это подтверждает выводы более ранних исследований [11–15]. Анализ изменения ускорений  $A$  и соответствующих значений ВАСТ не выявил четкого соответствия в их сопоставлении.

Изменения значений ГАСТ ( $G_V$ ) и скорости  $V$  на качественном уровне хорошо коррелируют за исключением выхода ТЦ на сушу и перемещения ТЦ по высокоаномальному району. Визуально значения ГАСТ ( $G_a$ ) коррелируют с ускорениями  $A$  еще сильнее. Влияние суши незаметно, но относительная близость суши и возможные изменения глубины океана могут заметно снижать влияние ГАСТ (ТЦ «Rammasun»).

Наряду с приведенными выводами необходимо отметить, что характер ТЦ предопределяется неким особым сочетанием состояний группы синоптических факторов среды, в которой зарождается, и развивается циклон. Это термический потенциал океана, относительная завихренность на нижних уровнях, параметр Кориолиса, относительная влажность средней тропосферы, вертикальный сдвиг горизонтального ветра и градиент эквивалентно-потенциальной температуры между двумя уровнями атмосферы. И хотя есть определенные основания предполагать, что, возможно, не все, что определяет поведение ТЦ нам известно, перечисленные факторы несомненно являются энергетически определяющими.

Принимая во внимание сказанное, мы должны осознать, что если АСТ и являются фактором, влияющим на характер ТЦ, то это фактор «2-го порядка». По мере развития циклона сложно меняется характер сочетания синоптических факторов, меняется роль каждого из них, изменяется орография территории прохождения

циклона. Все это может временами искажать наблюдаемую схожесть изменения кинематических характеристик ветра в ТЦ и АСТ. Поэтому не следует ожидать всегда хорошей корреляции между изменениями кинематических характеристик ветра и изменениями вертикальных и горизонтальных аномалий силы тяжести.

Помимо этого следует отметить, что адекватное представление значений ГАСТ в высокоаномальных районах требует применения либо модели, позволяющей рассчитывать составляющие АСТ в заданной точке, либо специальных процедур осреднения.

Однако полученные ранее и изложенные здесь результаты убеждают нас в существовании связей между важными характеристиками ТЦ и АСТ. Это, как кажется, представляет научный интерес — выявить физическую картину этих объяснений. Кстати, для ГАСТ возможное физическое объяснение кратко дано в настоящей работе.

Тем не менее представленные в работе результаты — это еще одно подтверждение того, что АСТ могут рассматриваться в качестве дополнительного фактора, влияющего на кинематику тропического циклона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Перемещение выбранных ТЦ проходит как по низко-, так и по высокоаномальным районам. Об этом свидетельствуют амплитуды составляющих АСТ. При этом последовательные изменения значений ГАСТ вдоль траекторий перемещения ТЦ существенно более пестрые, чем изменения значений ВАСТ.

2. Осреднение представляется важной процедурой для адекватного представления АСТ, особенно ГАСТ. С этой целью, очевидно, необходимо применять специальные процедуры осреднения. В качестве первого приближения для сопоставления с кинематическими характеристиками ветра в ТЦ использовалась полусумма составляющих АСТ, полученных в узле сетки модели АСТ, ближайшем к точке траектории ТЦ, и в результате осреднения в круге радиусом  $0.5^\circ$ .

3. Расчетными экспериментами определены и сопоставлены изменения кинематических характеристик ветра (максимальная скорость и его ускорения) в ТЦ и изменения ВАСТ и ГАСТ. Подчеркнем, что для ГАСТ это сделано впервые.

Изменения значений ВАСТ и скорости  $V$  в целом близки в противофазе и, в определенной мере, качественно коррелируют, что подтверждает выводы более ранних исследований. Анализ изменений ускорения  $A$  и соответствующих ему значений ВАСТ не выявил четкого соответствия в их сопоставлении.

Изменения значений ГАСТ ( $G_V$ ) и скорости  $V$  на качественном уровне хорошо коррелируют за исключением выхода ТЦ на сушу и перемещения ТЦ по высокоаномальному району. Значения ГАСТ ( $G_a$ ) коррелируют с ускорениями  $A$  визуально еще сильнее. Влияние суши незаметно, но относительная близость суши и возможные изменения глубины океана могут заметно снижать влияние ГАСТ (ТЦ «Rammasun»).

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Садоков В.П.* Гравитационное поле Земли и циркуляция атмосферы // Метеорология и гидрология. 1971. № 4. С. 14–26.
2. *Дмитриев А.А., Рудяев Ф.И.* О фоновой роли гравитационного поля Земли в атмосферных процессах // Труды ДВНИГМИ. 1979. Вып. 79. С. 143–147.
3. *Рудяев Ф.И.* Влияние аномального гравитационного поля Земли на циркуляционные системы атмосферы // ДАН. 1990. Т. 310. № 6. С. 1345–1448.
4. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. Т. 1. М.: Мир. 1986. 400 с.
5. Параметры общего земного эллипсоида и гравитационного поля Земли (параметры Земли 1990 г.). М.: ВТУ ГШ, РИО, 1991. 68 с.
6. *Macosco A.A., Panin B.D., Kousmina S.I.* On the Gravitational Wind // Res. Activ. in Atmos. and Ocean. Model., WMO, Geneva. 1998. № 27. P. 2.18–2.19.
7. *Макоско А.А., Панин Б.Д.* Динамика атмосферы в неоднородном поле силы тяжести. СПб.: РГГМУ. 2002. 246 с.
8. *Макоско А.А., Рубинштейн К.Г., Лосев В.М., Боярский Э.А.* Математическое моделирование атмосферы в неоднородном поле силы тяжести. М.: Наука. 2007. 58 с.
9. *Макоско А.А., Боярский Э.А., Афанасьева Л.В.* О задании поля силы тяжести в задачах математического моделирования атмосферы Земли // Динамика и математическое моделирование геофизических и гидрометеорологических процессов. Том VII // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними тех-

- ногенные катастрофы. В 8 томах. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 85–92.
10. *Макоско А.А., Боярский Э.А., Афанасьева Л.В.* О вычислении тангенциальных составляющих силы тяжести для задач математического моделирования атмосферы Земли // Геофизические исследования и биосфера. М.: ИФЗ РАН, 2008. Т. 7. Вып. 4. С. 5–13.
  11. *Ярошевич М.И.* О некоторых признаках влияния аномалии силы тяжести на тропические циклоны северо-западной части Тихого океана // ДАН, 2011. Т. 437. № 4. С. 548–542.
  12. *Ярошевич М.И.* Пространственное распределение тропических циклонов и аномалий силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 279–284.
  13. *Yaroshevich M.I.* Investigation of possible effect of gravitational field inhomogeneities on tropical cyclones // Trop. Cyclone Res. Rev. 2013. V. 2. № 2. P. 124–130.
  14. *Макоско А.А., Ярошевич М.И.* Оценки регрессионных связей характеристик тропических циклонов и аномалий силы тяжести // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 267–271.
  15. *Ярошевич М.И.* Скорость перемещения тропического циклона в поле аномалий силы тяжести // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 6. С. 641–644.

## On the Connection of the Kinematic Characteristics of the Wind in Tropical Cyclones and Anomalies of Force of Gravity

A. A. Makosko<sup>1,2\*</sup>, E. V. Nabokova<sup>3\*\*</sup>, M. I. Yaroshevich<sup>\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS*

*Pyzhevski per., 3, Moscow, 119017, Russia*

<sup>2</sup>*Center of Analytical Research at the Presidium of the RAS*

*Profsoyuznaya St., 65, building 6, Moscow, 117997, Russia*

<sup>3</sup>*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation*

*Bolshoy Predtechensky per., 9–13, Moscow, 123242, Russia*

*E-mail: \*aam@pran.ru, \*\*e.nabokova@gmail.com, \*\*\*myarosh32@gmail.com*

Received: 16.05.2019

Accepted: 07.08.2019

The existence of connections between the kinematic characteristics of wind (maximum speed and its acceleration) in a tropical cyclone and the values of gravity anomalies (vertical and horizontal components, respectively, VGA and GGA) along the paths of movement of tropical cyclones. It is shown that the change in VGA values is generally close in antiphase to changes in velocity and, to a certain extent, correlates qualitatively. Analysis of wind accelerations and the corresponding values of VGA did not reveal a clear match in their comparison. Changes in GGA values are close to changes in wind speed and at a qualitative level they correlate well except for the emergence of a shopping center on land and the movement of a shopping center in a highly anomalous region. Comparison of changes in maximum speed and acceleration of wind with changes in GGA values is performed for the first time.

**Keywords:** tropical cyclones, vertical and horizontal components of the anomaly of gravity, the maximum wind speed, the acceleration of the maximum wind speed.