

## Циклогенез Средиземноморско-Черноморского региона по спутниковым данным

Т. М. Баянкина, Т. Е. Данова

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия*  
*E-mails: bayankina\_t@mail.ru, danova8@mail.ru*

Работа посвящена исследованию циклонической деятельности в Средиземноморско-Черноморском регионе за период 1996–2009 гг. с января по март на основании данных с искусственного спутника Земли серии Meteosat на сетке  $10 \times 10$  км. Для выделения районов зарождения циклонов в исследуемом регионе использовался метод кластерного анализа. Оценка качества выделенных координат центров облачных вихрей проводилась методом сопоставления их с координатами барических центров на приземных синоптических картах и картах барической топографии 500 гПа. Показано, что повторяемость облачных вихрей над Средиземноморьем в течение всего периода соответствует повторяемости циклонов. Анализ географических областей формирования средиземноморских циклонов позволил выделить четыре основных района зарождения циклонов: северо-западный, юго-западный, центральный и восточный, отдельно выделены центры — Балканский п-ов и Чёрное море. Проведено сопоставление количества дней с циклонами по спутниковым данным и данным реанализа NCEP/NCAR. Показан ярко выраженный циклогенез в северо-западном районе Средиземноморья (54,5%), выявлены районы зимнего циклогенеза в Чёрном море. В зонах циклонической активности тропосфера характеризуется наличием струйных течений вертикальной мощностью до 8,5 км. В нижнем слое тропосферы наблюдается правый поворот и левое вращение ветра в средней и верхней тропосфере при значительных вертикальных градиентах ветра. Интенсификации процессов осадкообразования способствует превышение над средними значениями в три и более раза влагосодержания и влагопереноса.

**Ключевые слова:** Средиземноморско-Черноморский регион, спутниковые снимки, параметры циклонов, влажностно-динамические характеристики тропосферы

Одобрена к печати: 13.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-231-239

### Введение

Средиземноморские циклоны, зарождаясь в достаточно ограниченном и закрытом регионе Средиземного моря, не только оказывают существенное влияние на погоду и климат самого региона, но и являются причиной опасных явлений погоды, таких как сильные осадки, наводнения, штормовые ветры, оползни, грозы. Эти процессы трудны для прогнозирования из-за малых размеров циклонов и их быстрого роста над морем.

Особенностью средиземноморских циклонов является внезапное обострение процессов циклогенеза, обусловленного географическими особенностями региона с его сложной ортографией (Speranza, 2001), присутствием насыщенного влагой средиземноморского воздуха, что способствует повышенной бароклинной неустойчивости, интенсивному выделению скрытого тепла и увеличению температурных контрастов (Fantini, Davolio, 2001). Широтное перемешивание воздушных масс с разными термическими и барическими характеристиками приводит к неустойчивой стратификации атмосферы и возникновению циклонов (Lionello et al., 2002; Trigo et al., 2002) с мощными влажностно-динамическими параметрами (Нестеров, 2018; Danova, Nikiforova, 2016).

С развитием дистанционных методов исследования, усовершенствованных архивов данных глобальных и региональных реанализов (Акперов и др., 2017), методов численного моделирования появилась возможность получения достоверных характеристик циклонов (Андронников, Савченко, 2015; Лаврова и др., 2010), идентификации циклонических центров и их траекторий (Trigo, 2006). Исследования циклогенеза как одного из важнейших процессов,

определяющих условия погоды над Средиземноморско-Черноморским регионом, с использованием спутниковой информации и современных методов многомерного статистического анализа, а также возможность применения спутниковых данных для диагноза и прогноза опасных явлений погоды с привлечением современных технических средств являются актуальным вопросом в сфере гидрометеорологических задач и важнейшей научной и практической задачей.

### Используемые данные, материалы и методы

В настоящей работе использовались данные с геостационарных спутников серии Meteosat за период 1996–2009 гг., полученные из архива Европейской организации по эксплуатации метеорологических спутников (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites — EUMETSAT) с сайтов <http://www.sat.dundee.ac.uk> и <http://www.eumetsat.ini>. Для описания циклонической активности в Средиземноморско-Черноморском регионе использовалась база данных параметров циклонов, полученная с искусственных спутников Земли (ИСЗ) Meteosat на сетке 10×10 км за холодный период и сформированная в Морском гидрофизическом институте Российской академии наук (Баянкина, 2014). Дополнительно были взяты срочные данные реанализа NCEP/NCAR (NCEP — National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр США прогноза окружающей среды; NCAR — National Center for Atmospheric Research, Национальный центр США исследования атмосферы) о поле геопотенциала изобарической поверхности 1000 и 500 гПа на сетке 2,5×2,5° за 1996–2009 гг. Для выделения районов зарождения циклонов в Средиземноморско-Черноморском регионе использовался метод кластерного анализа, позволяющий проводить разбиение объектов по целому набору признаков и не накладывающий ограничений на вид рассматриваемых объектов. В работе использовался метод Варда (метод минимальной дисперсии). В качестве целевой функции применялась внутригрупповая сумма квадратов отклонений (сумма квадратов расстояний между каждой точкой (объектом) и средней по кластеру, содержащему этот объект):

$$W = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2, \quad (1)$$

где  $x_j$  представляет собой измерения  $j$ -й переменной (Балинова, 2004).

В качестве меры сходства использовался квадрат эвклидова расстояния:

$$d_{ij}^2 = \sum_{h=1}^m (x_{ih} - x_{jh})^2, \quad (2)$$

где  $x_{ih}, x_{jh}$  —  $h$ -е измерения  $i$ -й и  $j$ -й переменной соответственно.

Значения исходных данных предварительно были нормированы:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S}, \quad (3)$$

где  $x_i$  — значение данного наблюдения;  $\bar{x}$  — среднее;  $S$  — среднеквадратическое отклонение.

Для выделения физико-географических районов формирования циклонов в регионе применялась процедура кластерного анализа по девяти комбинациям метеорологических параметров для каждой стадии циклона. Так, для начальной стадии образования циклона использованы следующие параметры:  $t_0, t_1$  — продолжительность стадии жизни циклона;  $T_a$  — температура воздуха;  $T_s$  — температура морской поверхности;  $P$  — давление в центре циклона;  $\varphi, \lambda$  — координаты (широта и долгота) в центре циклона;  $\delta H/\delta t$  — вихревая составляющая;  $\Delta H, \Delta T_a$  — лапласианы (на 03:00 по московскому времени). Характеристики высотных циклонов определялись по данным синоптических высотных карт АТ<sub>700</sub> и ОТ<sub>500/1000</sub>. Аналогичные комбинации параметров были составлены для двух других стадий (максимального развития и заполняющегося) циклонов.

Определение центров облачных вихрей выполнялось методом дешифрирования по эволюции структуры облачности (Герман, 1985). Проведена оценка качества координат центров облачных вихрей методом сопоставления их с координатами барических центров на приземных картах погоды и барической топографии 500 гПа.

Для расчётов влажностно-динамических и энергетических характеристик тропосферы использовался массив данных радиозондирования атмосферы за 00:00 и 12:00 UTC, полученных из базы данных Вайомингского университета, США (англ. University of Wyoming, <http://www.weather.uwyo.edu>). Определение динамических характеристик осуществлялось для поверхностей Земля – 200 гПа на аэрологических станциях, близких к траектории движения циклона. Расчёт сдвига ветра проводился с учётом его скорости на нижнем и верхнем уровнях и высоты уровней. Сдвиг ветра по направлению определяется как угол между направлением ветра на нижнем и верхнем уровнях. Расчёт влагосодержания ( $w$ ) и переноса влаги ( $v_w$ ) выполнялся по методу О. А. Дроздова (4), (5).

$$w = \frac{1}{r_0} \int_{p_0}^p r dp, \quad (4)$$

где  $r$  — отношение смеси (г/кг);  $p, p_0, r, r_0$  — давление и отношение смеси на изобарических поверхностях.

$$v_w = 10(0,075r_0v_0 + 0,150r_{850}v_{850} + 0,175r_{700}v_{700} + 0,100r_{500}v_{500} + r_{400}v_{400}), \quad (5)$$

где  $v_w$  — пронос влаги над станцией ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $v_0, r_0$  и т. д. — модуль средней скорости ветра на поверхностях (м/с) и среднее значение отношения смеси на поверхностях (г/кг).

Расчёт кинетической энергии производился по полю давления и ветра с учётом рекомендаций, приведённых в работе (Danova, Nikiforova, 2016).

## Обсуждение результатов и заключение

В результате кластеризации массива данных были выделены группы циклонов, которые после нанесения на географическую карту локализовались в различных районах Средиземноморского бассейна. Выделены четыре основных района зарождения циклонов в Средиземном море: северо-западный (Генуэзский залив, Адриатическое и Тирренское моря), юго-западный (Северная Африка, Атлантический океан), центральный (Ионическое и Эгейское моря) и восточный (п-ов Малая Азия и о. Кипр), отдельно выделены центры — Балканский п-ов и Чёрное море, что подтверждается работами (Lionello et al., 2002; Trigo et al., 2002), основанными на данных реанализа.

Исследования показали, что максимальное количество циклонов (54,5 %) образуется в северо-западном районе, из них 25 % — в Генуэзском заливе. Не менее активными районами в образовании циклонов являются Балканский п-ов (балканские циклоны) и о. Кипр (кипрские циклоны), на которые приходится 13,0 и 8,4 % циклонов соответственно. Необходимо отметить, что на климатические характеристики Средиземноморского региона влияют циклоны, которые приходят из Атлантического океана (атлантические циклоны), и циклоны, образовавшиеся на севере Африки, их число составляет 11,5 и 7,5 % соответственно. Наибольшее количество циклонов (более 50) в исследуемом регионе образовалось в 2002 и 2008 гг. Максимальное проявление циклогенеза наблюдается в январе и марте, минимальное — в ноябре.

Валидация центров циклонов проводилась для 180 облачных вихрей на различных стадиях их развития сопоставлением положения облачного вихря на спутниковом изображении и центра циклона на приземной синоптической карте. Статистический анализ сопоставления центров показал, что во всех стадиях развития циклона центры вихревой структуры облачности в 79–84 % совпадают (в пределах 200 км) с центром циклонов у поверхности Земли. При этом наиболее часто (84 %) центры циклонов и облачных вихрей совмещаются в начальной

и последней стадиях и несколько реже (79 %) — в период максимального развития циклона. В начальной стадии центр циклона расположен к востоку от облачного вихря (т.е. ось циклона наклонена к западу), а в конечной стадии — к северу (ось циклона наклонена к югу). В период максимального развития центр циклона на синоптической карте наиболее удалён от облачного вихря и располагается к северо-востоку от него в среднем на 400 км. Полученное распределение центров циклонов у поверхности Земли относительно центра облачного вихря вполне закономерно и соответствует теории развития циклонов (Зверев, 1977).

Для оценки истинной величины погрешности при дешифрировании использовались цифровые одноградусные карты глобального массива реанализа NCEP по приземному атмосферному давлению. В основе используемых подходов к выделению центров циклонов были заложены статистические связи между центрами облачных структур (вихрей) и центрами низкого давления по приземному анализу. Дополнительно использовалась информация о положении зон конвергенции и завихренности поля приземного ветра, по которой были построены композитные карты распределения облачного покрова, приземного поля барической топографии, областей завихренности ветра и конвергенции (Efimov, Yurovsky, 2017) (рис. 1).

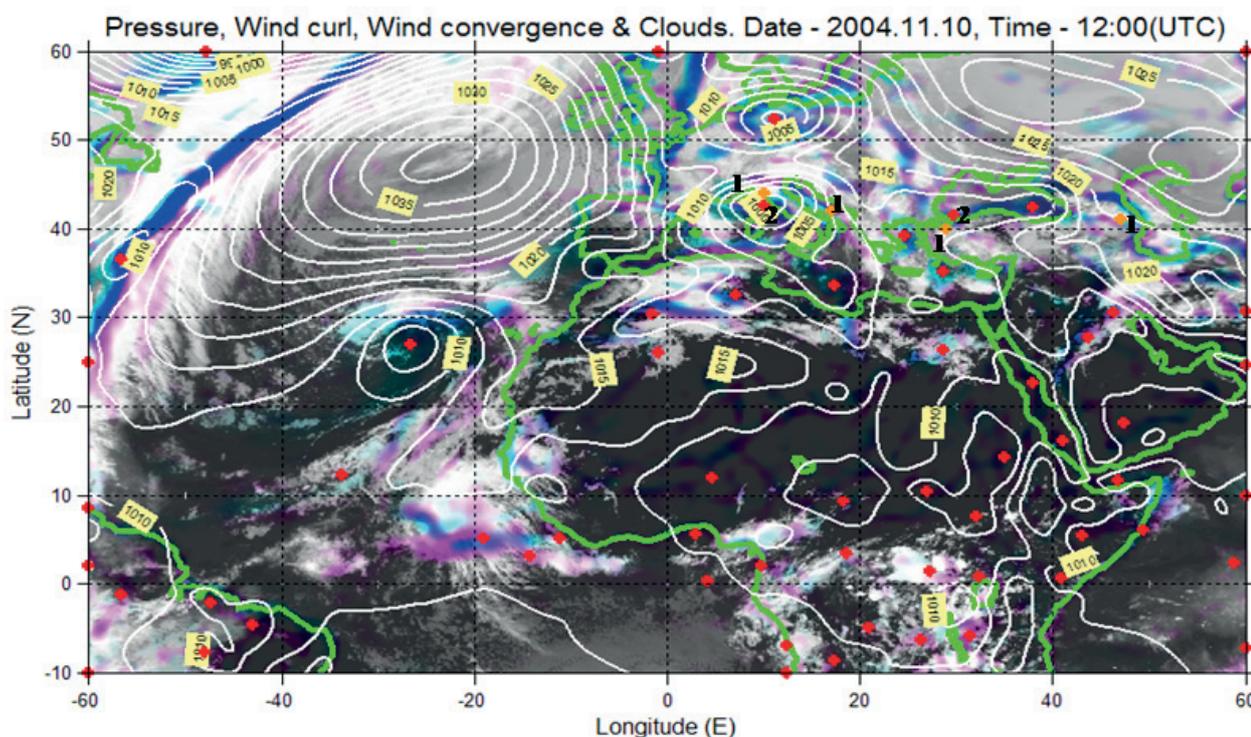


Рис. 1. Совмещённые положения центров циклонов, облачных вихрей зон конвергенции и завихренности поля приземного ветра на спутниковое изображение с ИСЗ Meteosat 10 ноября 2011 г. Красный квадрат — циклон в районе Генуэзского залива; синий — циклон в юго-западном районе Чёрного моря; зелёный квадрат — циклон в районе Адриатического моря

На рис. 1 указанные зоны и поле облачности хорошо согласуются с барическими центрами. В районе Генуэзского залива чётко выделен облачный вихрь и барический центр, имеющий замкнутые изобары (красный квадрат, цифры 1 и 2 соответственно), которые практически совпадают. Расстояние между центрами определяется разностью координат и составляет 156 км. Данный циклон находится в стадии максимального развития с атмосферным давлением в его центре 998,9 гПа. Совпадение центров циклона и облачного вихря (синий квадрат, цифры 1 и 2 соответственно) подтверждается и в юго-западном районе Чёрного моря, расстояние между ними составляет 180 км, давление в центре циклона — 1011,2 гПа. В районе Адриатического моря также выделен центр облачного вихря (зелёный квадрат,

цифра 1), но барического центра нет, так как он только начинает образовываться — на это указывает пониженное атмосферное давление 1007,6 гПа, что подтверждает теорию первоначального появления циклона в поле облачности, а затем — в поле атмосферного давления (Герман, 1985).

Скорость перемещения циклонов в начальной стадии в среднем составляет 20 км/ч, а по мере их эволюции увеличивается до 30–40 км/ч. В отдельных случаях скорость может достигать 80 км/ч и более. На спутниковых снимках по форме кривизны облачных вихрей можно определить увеличение или уменьшение скорости циклонов, что очень важно для оперативного прогноза. Например, выбросы перистых облаков в облачных вихрях указывают направление движения циклонов, а кривизна облачной спирали — их скорость. Чем быстрее увеличивается кривизна облачной спирали, тем медленнее движется циклон, а чем больше выбросов перистых облаков направлено по потоку их движения, тем их скорость больше. При перемещении циклонов над различной подстилающей поверхностью Средиземноморско-Черноморского региона их облачные параметры изменяются в размерах. В начальной стадии размеры облачных вихрей (по широте и долготе) составляют 500–600 км, затем они увеличиваются до 1000–1200 км, а в стадии окклюдирования циклонов линейные размеры уменьшаются в среднем до 800–900 км. Максимальная повторяемость 32–35 % облачных вихрей по широте ( $L_{\varphi}$ ) и долготе ( $L_{\lambda}$ ) приходится на 700–800 км. Облачные вихри вытянуты в основном в широтном направлении, преимущественно с запада на восток. Линейные размеры облачных вихрей по спутниковым снимкам согласуются с данными реанализа NCEP (Young et al., 2018). Однако облачное поле циклона превышает площадь замкнутой изобары в  $\sim 1/3$  раза. В результате анализа было выявлено, что наибольшее время существования облачных вихрей — 4–5 сут (45,8 %). Существование циклонов более 10 сут не превышает 3,0 %. Корреляционный анализ между количеством дней с циклонами по данным реанализа NCEP/NCAR и данным спутниковой информации показал, что коэффициенты корреляции с декабря по март для всего исследуемого региона составляют более 0,3, следовательно, они значимы на уровне 98 %.

Анализ траекторий циклонов показал, что основное направление перемещения средиземноморских циклонов происходит с запада на восток и с юго-запада на северо-восток, это обусловлено западным переносом воздушных масс атмосферы (Жалю, Попова, 1974; Trigo, 2006).

Для анализа средиземноморских циклонов, выходящих в черноморский регион, Чёрное море было условно разделено по меридиану  $34^{\circ}$  на две зоны: западную и восточную. За исследуемый период из северо-западной части Средиземноморья на акваторию Чёрного моря вышло 47,5 % циклонов. Наиболее часто (58,5 %) Средиземноморские циклоны выходят в западную зону Чёрного моря, из них 30,2 % циклонов — из северо-западного района Средиземноморья. В восточную зону Чёрного моря выходят 17,3 % циклонов из Средиземного моря, при этом из юго-западного и центрального районов Средиземного моря в Чёрное море выходит всего 3–5 % циклонов.

Для анализа влажностно-динамических параметров были выбраны случаи наблюдения циклонов в исследуемом регионе, ограниченные январём–февралём 2009 г., что даёт возможность сравнить изучаемые характеристики без учёта их ежегодной изменчивости. Использованы характеристики струйного течения, неустойчивого сдвига ветра, суммарной кинетической энергии тропосферы, а также влагосодержания и влагопереноса в зоне прохождения циклона. Как показал анализ характеристик тропосферы, прохождение циклонов всегда наблюдалось при струйных течениях в средней и верхней тропосфере. Наибольшими динамическими параметрами характеризовался циклон 15–18 января 2009 г., проследовавший из Ионического моря через акваторию Чёрного моря в район Керчи (рис. 2а, см. с. 236). Количественная оценка кинетической энергии и переноса влаги проводилась по значению фактического ветра. Выполненный расчёт кинетической энергии по слоям тропосферы в зоне циклона выявил, что наибольшими её запасами обладала тропосфера 15–18 января 2009 г. (рис. 2б), именно в эти даты наблюдались струи вертикальной мощностью от 4 до 8 км и струйное течение со скоростью от 33 до 50 м/с, максимальные запасы кинетической энергии принадлежали верхней тропосфере до 3150,68 кДж/м<sup>2</sup>.

По спутниковым данным с ИСЗ Meteosat 16.01.2009 в 12:00 UTC зафиксировано расположение циклона с ярко выраженной фронтальной облачностью (рис. 3а). Анализ вертикального распределения характеристик тропосферного ветра проводился по годографу ветра (рис. 3б).

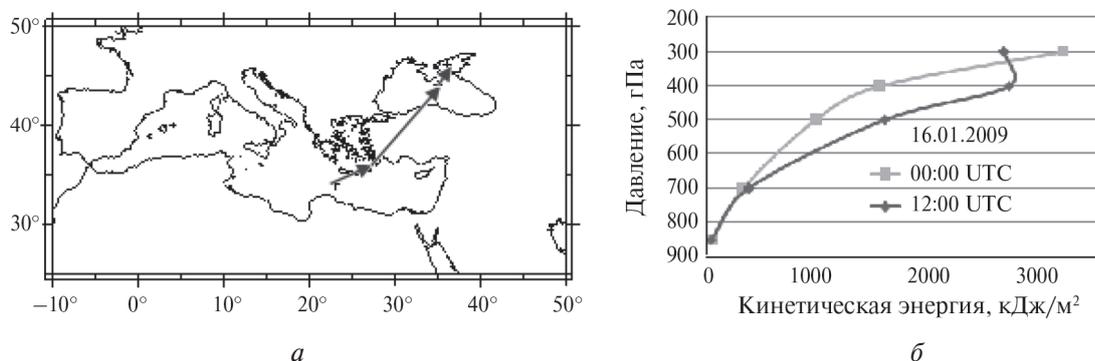


Рис. 2. Траектория циклона в Средиземноморско-Черноморском регионе по спутниковым данным с ИСЗ Meteosat за 15–18 января 2009 г. (а) и запасы кинетической энергии тропосферы за 16 января 2009 г. (кДж/м<sup>2</sup>) (б)

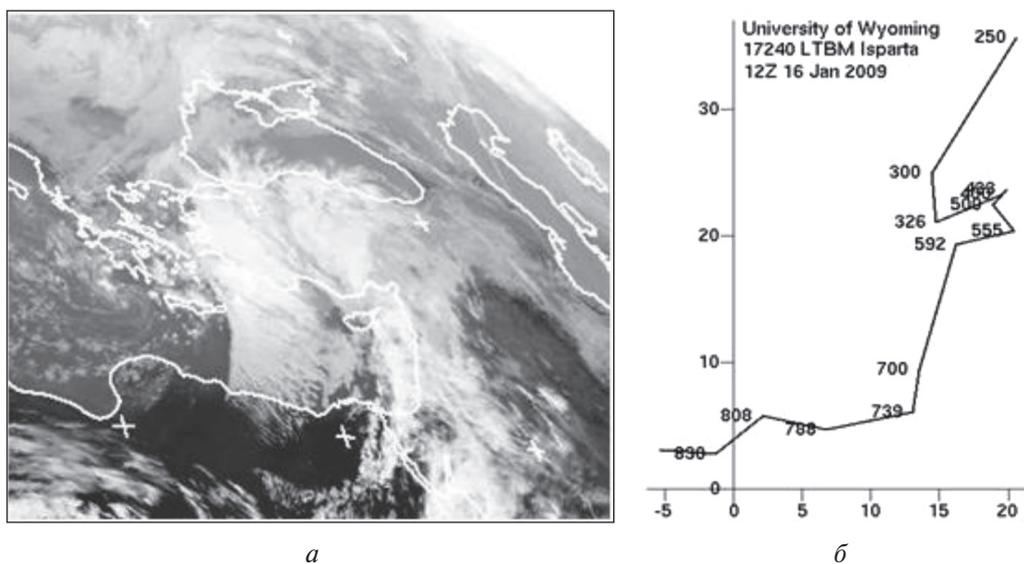


Рис. 3. Циклон в Средиземноморско-Черноморском регионе по спутниковым данным с ИСЗ Meteosat: а — расположение циклона 16 января 2009 г. в 12:00 UTC (<http://www.sat.dundee.ac.uk>); б — годограф ветра от 16 января 2009 г. в 12:00 UTC (<http://www.weather.uwo.edu>)

Годограф даёт наглядное представление о наиболее вероятных направлениях переноса воздушных потоков, изменении направления и скорости ветра. Как видим, поле ветра нижних уровней 16.01.2009 в 12:00 UTC при прохождении циклона с наиболее интенсивными динамическими параметрами характеризуется значительными вертикальными градиентами и правым вращением ветра в нижней тропосфере, а также изменением его направления с высотой. Расчёты показали, что в зоне циклонической активности наблюдался правый поворот ветра в нижнем слое от 20 до 170° при вертикальном градиенте ветра  $(4,97...6,6) \cdot 10^{-3}$ , а в средней и верхней тропосфере — левое вращение ветра от 15 до 45° при вертикальном градиенте  $(1,95...9,43) \cdot 10^{-3}$ .

Средние интегральные значения влагосодержания в холодный период года в Средиземноморско-Черноморском бассейне изменяются в пределах 8,0–13,0 кг/м<sup>2</sup>. На фоне средних величин выделяются дни с циклонической активностью, когда наблюдались интегральные значения влагосодержания (21,0–25,0 кг/м<sup>2</sup>). Полученные результаты интегрального вла-

госодержания свидетельствуют о значительной изменчивости в пределах синоптического масштаба, что соответствует выводам работы (Хуторова и др., 2018). Даже при малых значениях влагосодержания количество влаги, циркулирующей в тропосфере, может достигать больших значений, это зависит от скорости ветра в районе исследования. Превышение над средними показателями значений влагопереноса в три и более раз в дни с циклонической активностью ( $200,0\text{--}400,00 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ), безусловно, способствует интенсификации процессов осадкообразования.

Таким образом, в работе представлены результаты использования методов многомерного статистического анализа применительно к спутниковым данным, полученным с геостационарных спутников серии Meteosat. Применённая процедура кластерного анализа с набором определённых предикторов для каждой стадии циклона показала хорошее соответствие выявленных районов циклогенеза с результатами стандартного анализа синоптических данных. Проведённое сопоставление количества дней с циклонами по данным реанализа NCEP/NCAR и спутниковым данным также дало хорошо сопоставимые результаты. Корректные результаты определения центров облачных вихрей получены методом дешифрирования по эволюции структуры облачности. Анализ влажностно-динамических характеристик тропосферы показал, что прохождение циклонов всегда наблюдалось при струйных течениях в средней и верхней тропосфере, максимальные запасы кинетической энергии принадлежат верхней тропосфере. В зоне циклонической активности наблюдается правый поворот ветра в нижнем слое и левое вращение ветра в средней и верхней тропосфере при значительных вертикальных градиентах ветра. Увеличение влагопереноса в несколько раз в дни с циклонической активностью способствует интенсификации процессов осадкообразования. Следовательно, циклоны, зарождающиеся над Средиземноморско-Черноморским регионом, являются частой причиной сильных дождей, снегопадов, гололёда и штормовых ветров в регионе.

Проведённые исследования спутниковой информации позволили выявить региональные характеристики циклогенеза, определяемые как орографическими особенностями подстилающей поверхности, так и синоптическими условиями.

Работа выполнена по теме № 0827-2020-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата» (шифр «Взаимодействие океана и атмосферы»).

## Литература

1. Акперов М. Г., Мохов И. И., Дембицкая М. А. Арктические мезоциклоны по спутниковым данным, данным реанализа и модельным расчетам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 297–304.
2. Андронников В. В., Савченко П. Д. Прогнозирование фронтальных циклонов с использованием информации с метеорологических космических аппаратов // Гелиогеофизические исследования. 2015. С. 1–5.
3. Балинова В. С. Статистика в вопросах и ответах: учеб. пособие. М.: Изд-во ТК Велби, Проспект, 2004. 344 с.
4. Баянкина Т. М. База данных «Циклоническая активность Средиземноморско-Черноморского региона и параметры облачных вихрей циклонов, полученных по спутниковым изображениям с ИСЗ «Meteosat» за период 1996–2009 гг., за холодный период с ноября по март»: а. с. 54367 Украина. Рег. 02.04.2014.
5. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
6. Жалю Р., Попова Т. П. Использование снимков облачности для прогноза циклогенеза // Метеорология и гидрология. 1974. № 4. С. 14–23.
7. Зверев А. С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 711 с.
8. Лаврова А. А., Глебова Е. С., Тросников И. В., Казначеева В. Д. Моделирование эволюции серии средиземноморских циклонов с помощью региональной модели атмосферы // Метеорология и гидрология. 2010. № 6. С. 5–15.

9. *Нестеров Е. С.* Экстремальные циклоны над морями европейской части России // Гидрометеоролог. исслед. и прогнозы. 2018. № 1(367). С. 97–115.
10. *Хуторова О. Г., Хуторов В. Е., Дементьев В. В., Близоруков А. С., Корчагин Г. Е.* Изменчивость полей атмосферного влагосодержания по данным зондирования сигналами GPS-ГЛОНАСС в окрестностях г. Казани // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 252–258.
11. *Danova T. E., Nikiforova M. P.* Dynamic parameters of the troposphere at occurrence of hazardous weather phenomena in the Black Sea region // 22<sup>nd</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics: Proc. SPIE. 2016. V. 10035. 100355Y. DOI: 10.1117/12.2248768. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2248768>.
12. *Efimov V. V., Yurovsky A. V.* Formation of Vorticity of the Wind Speed Field in the Atmosphere over the Black Sea // Physical Oceanography. 2017. V. 6. P. 3–11.
13. *Fantini M., Davolio S.* Instability of Neutral Eady Waves and Orography // J. Atmospheric Sciences. 2001. V. 58. P. 1146–1154.
14. *Lionello P., Dalan F., Elvini E.* Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO<sub>2</sub> climate scenarios // J. Climate Research. 2002. V. 22. P. 147–159.
15. *Speranza A.* The Physical Mechanisms of Secondary Cyclogenesis // Recent Research Developments in Atmospheric Science. 2001. V. 1. P. 57–68.
16. *Trigo I. F.* Climatology and Interannual Variability of Storm-Tracks in the Euro-Atlantic Sector: a Comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR Reanalysis // Climate Dynamics. 2006. V. 26. No. 2–3. P. 127–143.
17. *Trigo I. F., Bigg G. R., Davies T. D.* Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean // J. Monthly Weather Review. 2002. V. 130. P. 549–649.
18. *Young A. H., Knapp K. R., Inamdar A., Hankins W., Rossow W. B.* The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product // J. Earth System Science Data. 2018. V. 10. P. 583–593.

## Cyclogenesis in the Mediterranean-Black Sea region from satellite data

T. M. Bayankina, T. E. Danova

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia  
E-mails: bayankina\_t@mail.ru, danova8@mail.ru*

The paper discusses the cyclonic activity in the Mediterranean-Black Sea region from January to March 1996–2009 on the basis of Meteosat satellite data on a 10×10 km grid. To identify the areas of cyclogenesis, the cluster analysis method was used. To assess the quality of the selected coordinates of the cloud vortices centers, they were compared with the coordinates of baric centers placed on surface synoptic maps and on maps of baric topography at the 500 hPa level. It was found that the frequency of cloud vortices over the Mediterranean during this period corresponds to that of cyclones. The performed analysis of the Mediterranean cyclones forming areas makes it possible to identify four main areas of cyclone origin over the Mediterranean: North-Western, South-Western, Central and Eastern, with the Balkan Peninsula and the Black Sea set apart. The number of days with cyclones found in satellite data was compared with NCEP/NCAR re-analysis data. Pronounced cyclogenesis in the Northwest (North-Western) region of the Mediterranean (54.5 %) was found, and areas of winter cyclogenesis in the Black Sea were identified. In the areas of cyclonic activity, the troposphere contains jet currents with a vertical thickness of up to 8.5 km. In the lower layer of the troposphere, right wind rotation was observed, and in the middle and upper troposphere with significant vertical gradients, left wind rotation was observed. Excess of the moisture content and moisture transfer above their average values on three or more times promotes the intensification of precipitation processes.

**Keywords:** Mediterranean-Black Sea region, satellite images, cyclone parameters, moisture-dynamic characteristics of the troposphere

Accepted: 13.04.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-231-239

## References

1. Akperov M. G., Mokhov I. I., Dembitskaya M. A., Arkticheskie mezotsiklony po sputnikovym dannym, dannym reanaliza i model'nym raschetam (Arctic mesocyclones from satellite data, reanalyses data and model simulations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 297–304.
2. Andronnikov V. V., Savchenko P. D., Prognozirovanie frontal'nykh tsiklonov s ispol'zovaniem informatsii s meteorologicheskikh kosmicheskikh apparatov (Prognostication of frontal cyclones with the use the Information from Meteorological Satellites), *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2015, pp. 1–5.
3. Balinova B. C., *Statistika v voprosakh i otvetakh* (Statistics in questions and answers), Moscow: Izd. TK Velbi, Prospekt, 2004, 344 p.
4. Bayankina T. M., *Baza dannykh "Tsiklonicheskaya aktivnost' Sredizemnomorsko-Chernomorskogo regiona i parametry oblachnykh vikhrei tsiklonov, poluchennykh po sputnikovym izobrazheniyam s ISZ Meteosat za period 1996–2009, za kholodnyi period s noyabrya po mart"* (Cyclonic activity of the Mediterranean-Black Sea region and the parameters of cloud vortices of cyclones obtained from satellite images from the Meteosat satellite for the period 1996–2009, for the cold period from November to March), a. s. No. 54367 Ukraine, Reg. 02.04.2014.
5. German M. A., *Kosmicheskie metody issledovaniya v meteorologii* (Space methods of research in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 351 p.
6. Zhalyu R., Popova T. P., Ispol'zovanie snimkov oblachnosti dlya prognoza tsiklogeneza (Using images of clouds for cyclogenesis forecast), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1974, Vol. 4, pp. 14–23.
7. Zverev A. S., *Sinopticheskaya meteorologiya* (Synoptic meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 711 p.
8. Lavrova A. A., Glebova E. S., Trosnikov I. V., Kaznacheeva V. D., Modelirovanie evolyutsii serii sredizemnomorskikh tsiklonov s pomoshch'yu regional'noi modeli atmosfery (Modeling the evolution of a series of Mediterranean cyclones using a regional atmospheric model), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, Vol. 6, pp. 5–15.
9. Nesterov E. S., Ekstremal'nye tsiklony nad moryami evropeiskoi chasti Rossii (Extreme cyclones over the seas of the European part of Russia), *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2018, No. 1(367), pp. 97–115.
10. Khutorova O. G., Khutorov V. E., Dement'ev V. V., Blizorukov A. S., Korchagin G. E., Izmenchivost' polei atmosfernogo vlagosoderzhaniya po dannym zondirovaniya signalami GPS-GLONASS v okrestnostyakh g. Kazani (Atmospheric moisture content variability from GPS-GLONASS data near the Kazan city), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 252–258.
11. Danova T. E., Nikiforova M. P., Dynamic parameters of the troposphere at occurrence of hazardous weather phenomena in the Black Sea region, *22<sup>nd</sup> Intern. Symp. Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, Proc. SPIE*, 2016, Vol. 10035, 100355Y, DOI: 10.1117/12.2248768.
12. Efimov V. V., Yurovsky A. V., Formation of Vorticity of the Wind Speed Field in the Atmosphere over the Black Sea, *Physical Oceanography*, 2017, Vol. 6, pp. 3–11.
13. Fantini M., Davolio S., Instability of Neutral Eady Waves and Orography, *J. Atmospheric Sciences*, 2001, Vol. 58, pp. 1146–1154.
14. Lionello P., Dalan F., Elvini E., Cyclones in the Mediterranean region: The present and the doubled CO<sub>2</sub> climate scenarios, *J. Climate Research*, 2002, Vol. 22, pp. 147–159.
15. Speranza A., The Physical Mechanisms of Secondary Cyclogenesis, *Recent Research Developments in Atmospheric Science*, 2001, Vol. 1, pp. 57–68.
16. Trigo I. F., Climatology and Interannual Variability of Storm-Tracks in the Euro-Atlantic Sector, a Comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR Reanalysis, *Climate Dynamics*, 2006, Vol. 26, No. 2–3, pp. 127–143.
17. Trigo I. F., Bigg G. R., Davies T. D., Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *J. Monthly Weather Review*, 2002, Vol. 130, pp. 549–569.
18. Young A. H., Knapp K. R., Inamdar A., Hankins W., Rossow W. B., The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product, *J. Earth System Science Data*, 2018, Vol. 10, pp. 583–593.