

Приземные волны холода на территории Крымского полуострова по наземным и спутниковым наблюдениям

Т. Е. Данова, Т. М. Баянкина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mails: danova8@mail.ru, bayankina_t@mail.ru

Выявлены и интерпретированы пространственно-временные изменения волн холода различного генезиса на территории Крымского полуострова на основании сравнительного анализа спутниковых данных, полученных с помощью спектрорадиометра MODIS/Terra, синоптической информации и данных дискретной сети метеорологических наблюдений. Для определения волн холода использовались пороговые значения 3-го перцентиля для годового распределения минимальной и среднесуточной температуры. Выявлено, что волны холода в регионе по направлению делятся на пять групп: три группы, имеющие северную составляющую в направлении (76 %), две группы южного направления (24 %). Для всех групп характерны общие закономерности: формированию волны холода предшествует прохождение циклона и связанных с ним фронтальных разделов, длительность и интенсивность последующего затока холода зависят от ориентации зоны барических градиентов и их величины. Выделены наиболее мощные волны холода, связанные с вторжением с северо-восточного направления на побережье Чёрного моря, при которых по данным MODIS наблюдаются безоблачные зоны с выраженным направлением стока. Зоны выраженного стока свидетельствуют о значительной скорости ветра, характерной для Черноморской и Новороссийской боры в зимний период.

Ключевые слова: Черноморский регион, Крымский полуостров, волны холода, спутниковые снимки MODIS/Terra

Одобрена к печати: 02.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-349-363

Введение

Современные исследования климатической системы свидетельствуют о её нестабильности, которая характеризуется увеличением повторяемости и интенсивности экстремальной температуры (Houghton et al., 2001; Klein Tank et al., 2002; Rahmstorf, Coumou, 2011). Особенности географического положения Крыма обуславливают особый режим циркуляционных процессов над ним, от которых зависит погода и образующие её метеорологические элементы. Атмосферная циркуляция над Чёрным морем и Крымским полуостровом находится под влиянием определённых факторов и имеет свои особенности (Бедрицкий и др., 2001; Горбунов и др., 2016; Кононова, 2014). Прежде всего, это крупномасштабные синоптические циклоны, которые в основном возникают в Северной Атлантике и перемещаются в западном направлении через Европу или Средиземное море на Чёрное море. Зимой над Чёрным морем наблюдается пониженное давление, и вследствие этого в Крым часто вторгаются холодные воздушные массы или арктический воздух из северных районов (Ефимов и др., 2009). Изменения температуры воздуха и её перепады являются существенной чертой климатического режима Крымского полуострова (Данова, 2023). Резкие понижения температуры воздуха наступают при вторжениях холодного арктического воздуха, а также в период формирования гребня сибирского антициклона, направленного на юго-запад. Экстремальные отрицательные значения приземной температуры воздуха формируются за достаточно короткий временной интервал и часто носят волновой характер (Ергина, Жук, 2018).

В современном анализе атмосферных процессов большое внимание уделяется спутниковым наблюдениям, так как они обладают достаточным пространственно-временным разре-

шением, дают представление о физических особенностях атмосферы и помогают при анализе (Герман, 1985; Толмачева, 2012). Развитие синоптического процесса в атмосфере обнаруживается в поле облачности раньше, чем её признаки появляются в поле температуры воздуха или давления на синоптических картах.

О текущем метеорологическом состоянии исследуемого региона качественную информацию предоставляют спутники, находящиеся на солнечно-синхронной полярной орбите (на высоте 705 км). Одним из таких является спутник Terra, на котором установлен спектро-радиометр MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), имеющий 36 спектральных каналов в видимом и инфракрасном диапазонах спектра с пространственным разрешением от 250 м до 1 км. Благодаря непрерывному режиму работы и широкой полосе съёмки (2330 км) для территории России наблюдения проводятся не реже четырёх раз в сутки (<https://www.scanex.ru/data/satellites/terra-aqua-modis>). Это позволяет использовать данные MODIS для решения разнообразных задач по регулярному мониторингу природных явлений в пределах крупного региона (Галеев и др., 2004; Salomonson et al., 1989). Индикатором на спутниковых снимках являются облака, связанные с атмосферными фронтами и циклонами (Галеев и др., 2004; Justice et al., 1987). В работах (Баянкина, Данова, 2020; Данова, 2023; Lionello et al., 2002; Trigo et al., 2002) показано, что активизация циклонической деятельности зимой в регионах приводит к опасным явлениям погоды.

Анализ качественных и количественных характеристик волн жары и холода на территории Крымского полуострова, проведённый в исследовании (Данова, 2023), показал, что, несмотря на тёплый и влажный климат, суммарная интенсивность волн холода здесь более чем в два раза превышает суммарную интенсивность волн жары. Последствия мощных и длительных волн холода на Крымском полуострове оказывают негативное воздействие на устойчивое функционирование сельскохозяйственной отрасли, на работу обширного туристско-рекреационного комплекса, вносят значительные изменения в формирование урбанизированной территории. Кроме того, длительные волны холода могут создавать риски для здоровья населения, так как около половины жителей территории полуострова (43,5 %) относятся к группе повышенного риска при экстремальной температуре воздуха (Данова, 2023).

В этих условиях необходимо осуществление эффективных действий властей, поддерживаемых грамотным управлением на разных уровнях и в разных отраслях. Одним из условий правильного прогноза экстремальных проявлений температурного режима является систематизация волн холода, наблюдающихся на территории Крымского полуострова, по различным параметрам. В связи с этим актуальным вопросом становится привлечение современных технических средств, представленных спутниковой аппаратурой.

Цель работы — применение спутниковой и наземной информации для выявления пространственно-временных тенденций волн холода различного генезиса и прогноза экстремальных проявлениях приземного температурного режима на территории Крымского полуострова.

Используемые данные и методика исследования

Исследование изменения числа случаев, интенсивности и продолжительности волн холода на территории Крымского полуострова для различных периодов с 2006 до 2022 г. проводилось по данным метеорологической сети (*рис. 1*, см. с. 351) из архива «Расписание погоды» (<http://rp5.ru>). Использованы срочные (восемь наблюдений в сутки) данные по 19 метеостанциям для территории Крыма за декабрь — март, рассчитывались среднесуточные значения и выбиралась минимальная температура воздуха.

В связи с энергетической блокадой полуострова в 2014 г. данные с 01.04.2015 по 31.05.2017 отсутствуют. Направление перемещения атмосферных фронтов и барических образований (циклонов) отслеживались по синоптическим приземным картам (<https://www.wetter3.de>) и спутниковым изображениям Terra по спектрорадиометру MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).



Рис. 1. Метеорологические станции Крымского полуострова

Методика определения волн холода

Обычно термические волны в международных исследованиях периодов экстремального холода определяются на уровне 2,5-го перцентиля (Sheridan, Allen, 2018). В исследовании (Ревич, Григорьева, 2021) значения 3-го и 97-го перцентилей распределения среднесуточной температуры предложены как ориентировочные показатели наступления волны холода (жары), опасной для здоровья населения, по достижении которых необходимо проведение соответствующих профилактических мероприятий, именно эта пороговая величина включена в Методические рекомендации Роспотребнадзора (Оценка..., 2012). Учитывая рекомендации, а также то, что мы рассматриваем волны холода с точки зрения их негативного влияния в различных отраслях народного хозяйства, для порога волны холода принято значение 3-го перцентиля. В представленном исследовании учитываются волны длительностью 3–7 дней, связано это с тем, что волны холода (как и волны жары) являются метеорологическим явлением. Используемая градация 3–7 дней соответствует временной шкале синоптического масштаба и хорошо соотносится с горизонтальными размерами атмосферных образований, приводящих к формированию термических волн. В наибольшей степени это относится к 3–4-дневным волнам холода, которые чаще всего образуются на холодных фронтах 2-го рода, в этом случае волна холода сопровождается значительным и быстрым падением атмосферного давления, резким усилением ветра, сильными осадками. В Крыму на 3- и 4-дневные волны холода приходится 61,8 % от всех выявленных волн холода (Данова, 2023). Таким образом, в расчётах волн холода для территории Крымского полуострова использовалось определение: волна холода (превышение порогового значения) — это последовательность ≥ 3 дней с температурой ≤ 3 -го перцентиля круглогодичного распределения среднесуточной и минимальной температуры в период с 2006 по 2022 г. Интенсивность волны рассчитывалась как суммарное количество градусов ниже порогового значения температуры воздуха (Barnett et al., 2012). Для определения длительности волны холода вычислялся промежуток времени в сутках, когда значение среднесуточной температуры воздуха опускалось ниже порогового. Определялось также число пиков в волне холода. Учитывая, что она анализировалась по территории всего полуострова, то пик холода рассчитывался как суммарное максимальное значение температуры воздуха ниже порога по всем станциям полуострова для конкретной даты. Фактор избыточного холода вычислялся как суммарная разность температуры от порогового значения, осреднённая за период волны (Piticar et al., 2017). Пространственное распределение волны холода на территории Крымского полуострова определялось на основании построенных карт превышения порогового значения для каждой станции на дату прохождения волны.

Результаты и обсуждение исследования

Применение порогового значения 3-го перцентиля позволило выделить периоды последовательных волн холода, отмеченных на каждой станции, и изучить характеристики отдельных волн. На территории Крымского полуострова наибольшая повторяемость (85 %) волн холода приходится на 3–7 дней, подобная длительность волн соответствует продолжительности процессов синоптического масштаба.

Детальный анализ синоптических процессов каждого случая волны холода позволил выявить повторяемость волн холода различного направления. Таким образом, все участвующие в эксперименте волны холода были разбиты на пять групп по направлению, откуда эти волны пришли на территорию Крымского полуострова. Три группы имеют северную составляющую в направлении (около 76 %), две группы — южную (24 %) (таблица). Самые мощные и длительные (14–30 дней) волны холода приходят на полуостров с северо-востока (6,9 %) и приносят около $-164,0$ °С избыточного холода суммарно в сутки по всей территории распространения волны, для этого направления волн характерна максимальная суммарная интенсивность волны.

Характеристики волн холода (2006–2022)

Направление волн холода	Число волн, %	Длительность волн, дни	Количество пиков	Максимальная суммарная интенсивность волны, °С	Средний избыточный холод, °С
Северное	13,8	6–16	1–3	–892,7	–63,8
Северо-восточное	6,9	14–30	1–4	–3298,0	–164,3
Северо-западное	55,2	4–21		–1317,8	–114,0
Южное	17,2	3–15		–566,6	–73,4
Юго-западное	6,9	4–6	1	–330,1	–55,0

Волны холода северного направления

В качестве примера рассмотрим волну холода северного направления за период 14.02–23.02.2015 (рис. 2, см. с. 353). Вторжение 14.02.2015 холодного воздуха с севера понизило температуру воздуха в Крыму до -9 °С (см. рис. 2а). Длительность волны составляла 10 дней и имела два пика с минимальной температурой $T_{\min}(19.02.2015) = -19,8$ °С и $T_{\min}(21.02.2015) = -11,9$ °С (см. рис. 2б). Суммарное превышение порогового значения за эту волну составило $-360,6$ °С, при этом максимальный суточный избыточный холод, поступивший на территорию Крыма в день с минимальной температурой, составил $-99,6$ °С. На карте приземного анализа от 14.02.2015 наблюдается прохождение по территории полуострова холодного фронта с давлением 1020 гПа, за фронтом с севера перемещается обширный антициклон с давлением в центре 1045 гПа (см. рис. 2в).

На спутниковом снимке хорошо прослеживается чёткая структура холодного фронта с резко очерченными краями в виде яркой полосы облачности, которая отделяется от предфронтальной и зафронтальной облачности антициклоническими безоблачными зонами (см. рис. 2г). Максимальный заток холода на полуостров (19.02.2015) обусловлен перемещением обширного антициклона (давление в центре 1040 гПа) с северо-запада на Чёрное море, при этом на юго-востоке расположен циклон (1010 гПа) (см. рис. 2д). Над акваторией Чёрного и Азовского морей на спутниковом снимке (19.02.2015) между двумя барическими образованиями наблюдается безоблачная зона, которая сформирована затоком холодного воздуха северного направления (см. рис. 2е).

Волны холода северо-восточного направления

В качестве примера рассмотрим волну холода на Крымском полуострове за период 17.01–30.01.2006, начало которой отмечалось в Керчи (рис. 3а, см. с. 354). Волна длительно-

стью 14 дней имела два пика (см. рис. 3б). Факт наблюдения пиков минимальной температуры позже пиков с максимальным приходом избыточного холода на станциях Клепинино и Нижнегорский, которые находятся в центральной части Крыма, объясняется продолжающимся затоком холода на фоне орографических особенностей подстилающей поверхности.

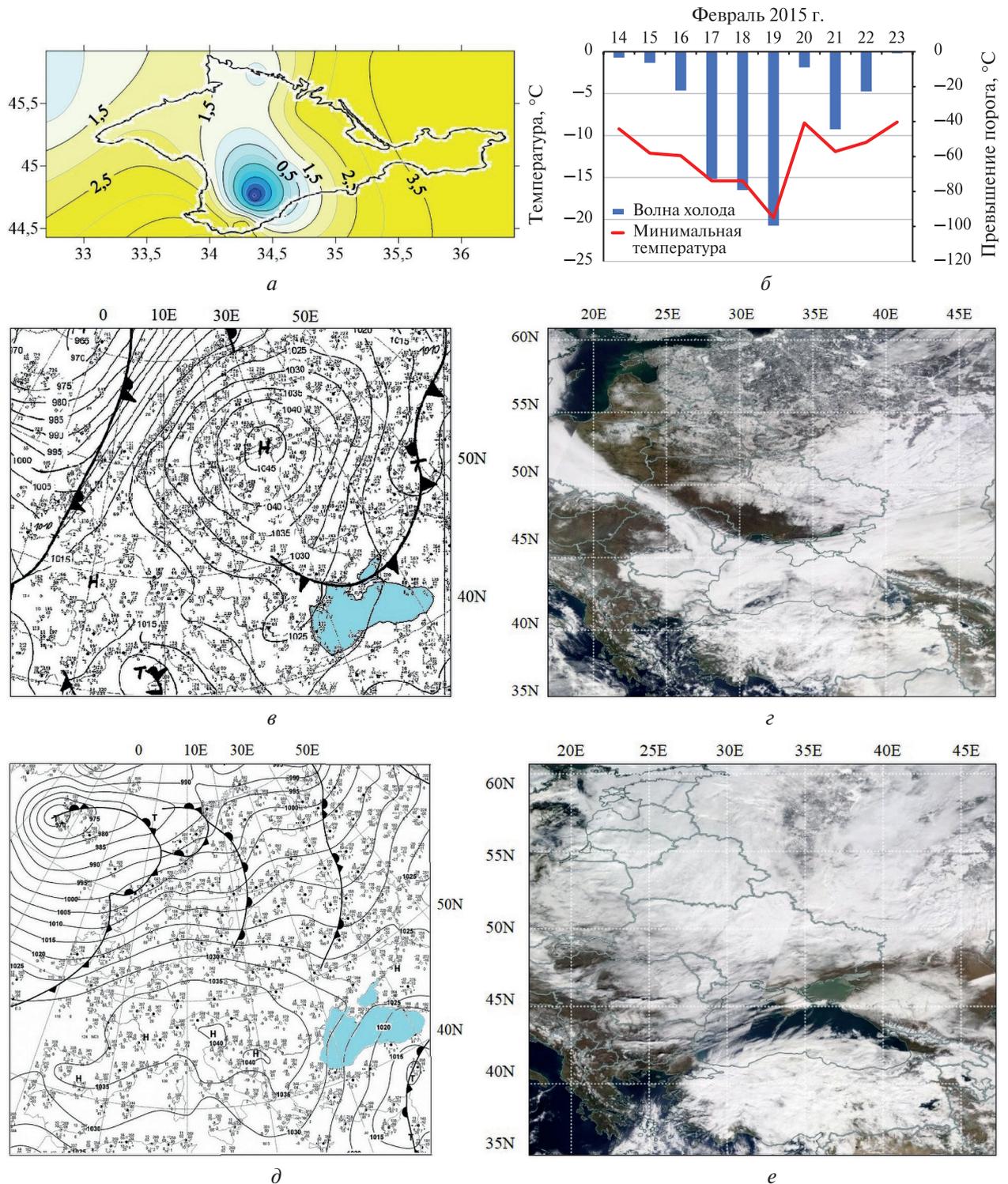


Рис. 2. Волна холода северного направления (14.02–23.02.2015): а — начало волны холода (14.02.2015); б — суточные значения суммарного превышения порога холода и минимальные значения температуры воздуха; в — карта приземного анализа (14.02.2015); з — спутниковый снимок MODIS/Terra (14.02.2015); д — карта приземного анализа (19.02.2015); е — спутниковый снимок MODIS/Terra (19.02.2015)

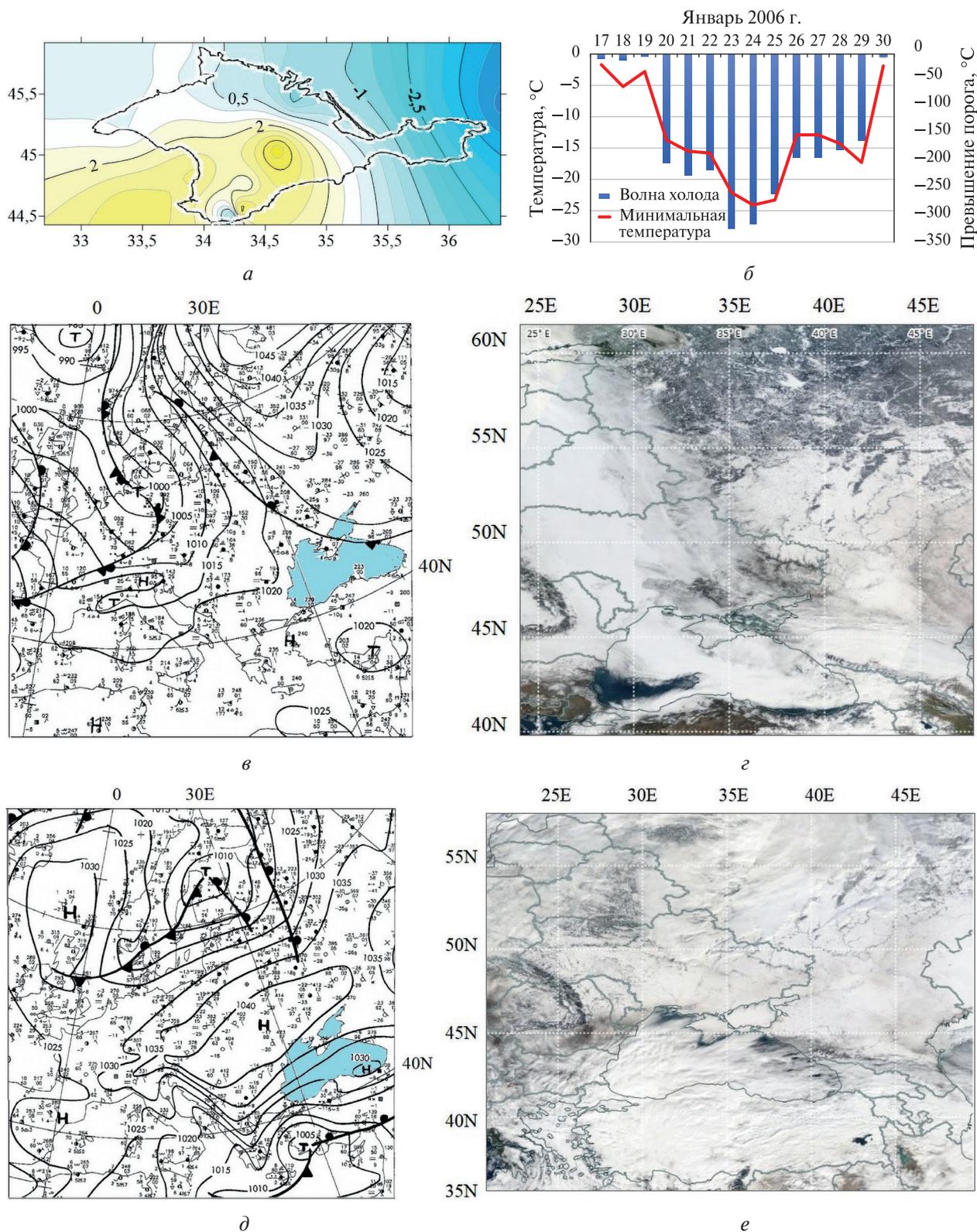


Рис. 3. Волна холода северо-восточного направления (17.01–30.01.2006): а — начало волны холода (17.01.2006); б — суточные значения суммарного превышения порога холода и минимальные значения температуры воздуха; в — карта приземного анализа (17.01.2006); г — спутниковый снимок MODIS/Terra (17.01.2006); д — карта приземного анализа (25.01.2006), е — спутниковый снимок MODIS/Terra (25.01.2006)

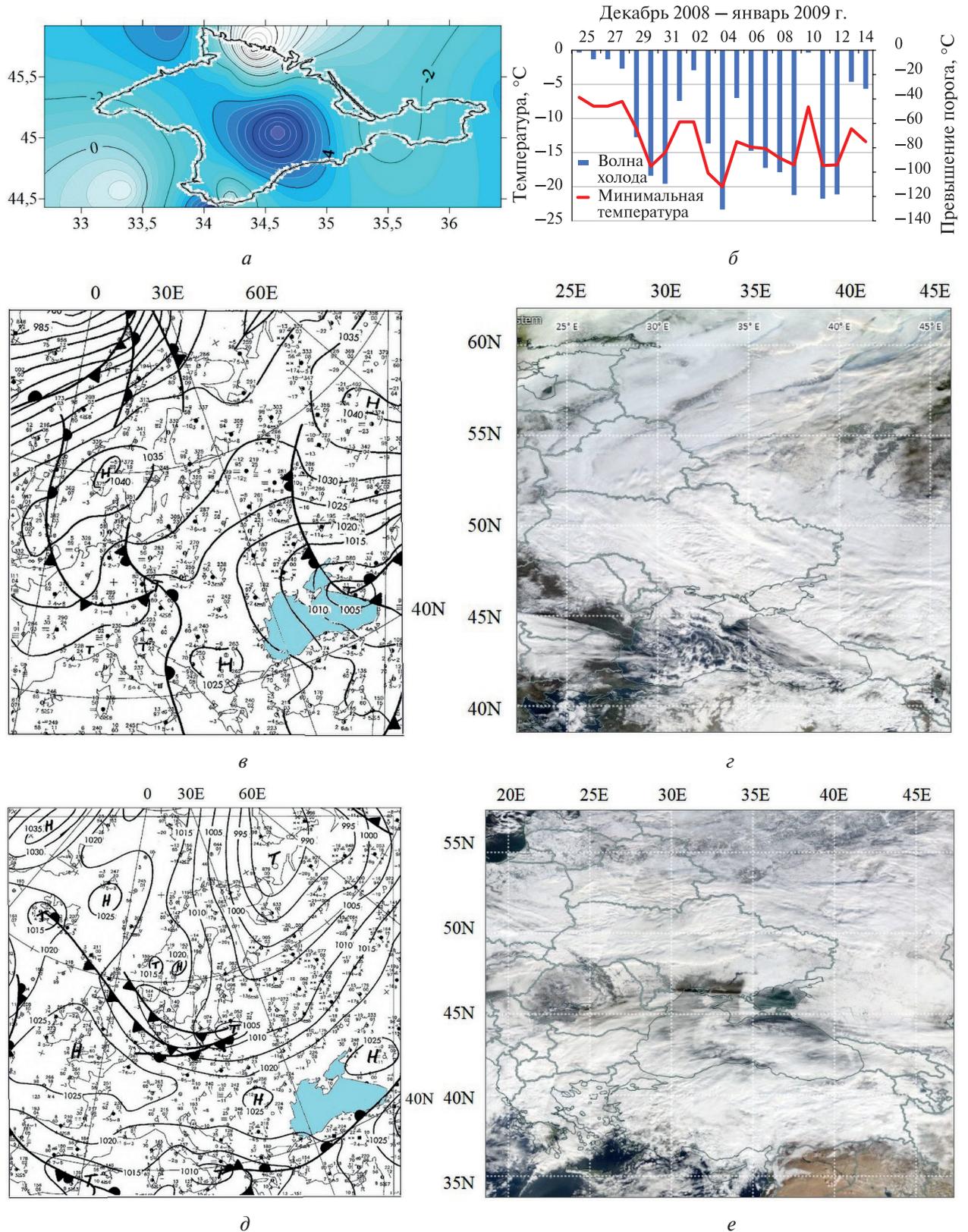


Рис. 4. Волна холода северо-западного направления (25.12.2008–10.01.2009): а — начало волны холода (25.12.2008); б — суточные значения суммарного превышения порога холода и минимальные значения температуры воздуха; в — карта приземного анализа (25.12.2008); г — спутниковый снимок MODIS/Terra (25.12.2008); д — карта приземного анализа (04.01.2009); е — спутниковый снимок MODIS/Terra (04.01.2009)

Возникновение волны холода (17.01.2006) представлено на карте приземного анализа (см. *рис. 3в*), где показано смещение активного холодного фронта с северо-востока на территорию полуострова. На спутниковом снимке (см. *рис. 3г*) облачность активного холодного фронта состоит из слоистообразных облаков с широкой фронтальной полосой одинакового яркого тона, видна как в видимом, так и инфракрасном диапазонах спектра. За фронтом с северо-востока перемещается обширный антициклон с выраженным барическим гребнем, ориентированным с севера на юг, с которым связан заток холодных масс воздуха. При этом на юге Чёрного моря наблюдается сформированный циклон (см. *рис. 3в*). На спутниковом снимке ярко выражен фронтальный раздел, смещающийся с северо-востока, с границей, проходящей над Азовским морем (см. *рис. 3г*).

По данным наземной сети метеонаблюдения в период 22.01–26.01.2006 в районе Новороссийска зафиксирована бора с максимальной скоростью ветра 37 м/с при температуре воздуха $-14,4^{\circ}\text{C}$. Карта приземного анализа за 25.01.2006 показывает, что севернее Крымского полуострова сформировался антициклон, ограниченный изобарой 1040 гПа, а южнее Чёрного моря циклон с изобарой 1005 гПа (см. *рис. 3д*). Такая конфигурация барического поля и большие градиенты способствуют устойчивому притоку холодного воздуха с северо-востока и являются причиной длительной волны холода и условием для формирования боры в районе Новороссийска. Анализ спутниковых снимков показал, что к 25.01.2006 на побережье Чёрного моря в районе г. Новороссийска и у южного берега Крыма образовались безоблачные зоны с выраженным направлением стокового ветра, который свидетельствует о значительной скорости ветра в этих зонах (см. *рис. 3е*).

Стоковые ветры, возникающие в прибрежной зоне действия волн холода, характерны для Черноморской боры в зимний период (Ефимов, Комаровская, 2015) и для Новороссийской боры. В работах (Ефимов и др., 2009, 2019) показано, что в холодный период года истинная бора является борой фронтального типа, развивающейся на периферии северного антициклона и южного циклона, что подтверждается наблюдениями.

Волны холода северо-западного направления

На *рис. 4а* (см. с. 355) показана волна холода северо-западного направления длительностью 21 день (25.12.2008–10.01.2009), которая представляет собой ансамбль из четырёх волн, где зафиксированы четыре ярко выраженных температурных пика. Минимальная суточная приземная температура воздуха -20°C наблюдалась на станции Нижнегорский 04.01.2009 (см. *рис. 4б*).

На карте приземного анализа (см. *рис. 4в*) за 25.12.2008 наблюдается перемещение с северо-запада над акваторией Чёрного моря циклона с центральной изобарой 1005 гПа, с которым связан фронт окклюзии, ориентированный с северо-запада на юго-восток. При этом северо-западнее Чёрного моря формируется обширная область высокого давления 1025 гПа. На спутниковом снимке (см. *рис. 4г*) вся область действия циклона и фронта окклюзии представлена плотной облачностью, на западе которой наблюдается малооблачная зона, характерная для антициклональной погоды. Карта приземного анализа за 04.01.2009 свидетельствует о формировании обширной области высокого атмосферного давления 1025 гПа, которая простирается от Атлантического океана до Каспийского моря (см. *рис. 4д*). Над северной частью Чёрного моря наблюдается малооблачная зона и антициклональная погода (см. *рис. 4е*).

Волны холода южного направления

Волна холода южного направления наблюдалась в регионе в период 13.02–23.02.2011 (*рис. 5*, см. с. 357). Она образовалась в результате зафронтального затока холода, связанного с гребнем антициклона, орографически ориентированным с северо-запада (см. *рис. 5а*).

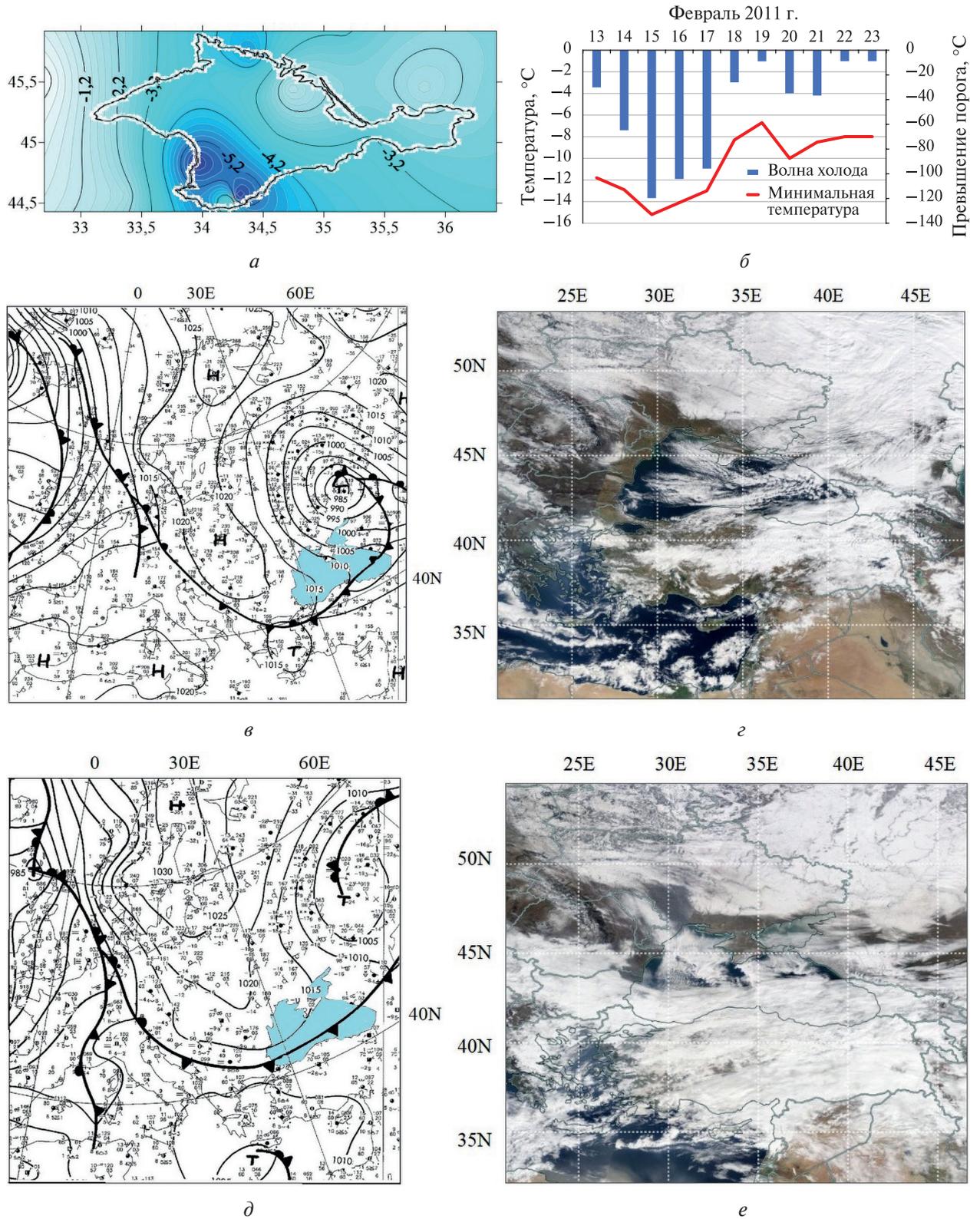


Рис. 5. Волна холода южного направления (13.02–23.02.2011): а — начало волны холода (13.02.2011); б — суточные значения суммарного превышения порога холода и минимальные значения температуры воздуха; в — карта приземного анализа (13.02.2011); г — спутниковый снимок MODIS/Terra (13.02.2011); д — карта приземного анализа (15.02.2011); е — спутниковый снимок MODIS/Terra (15.02.2011)

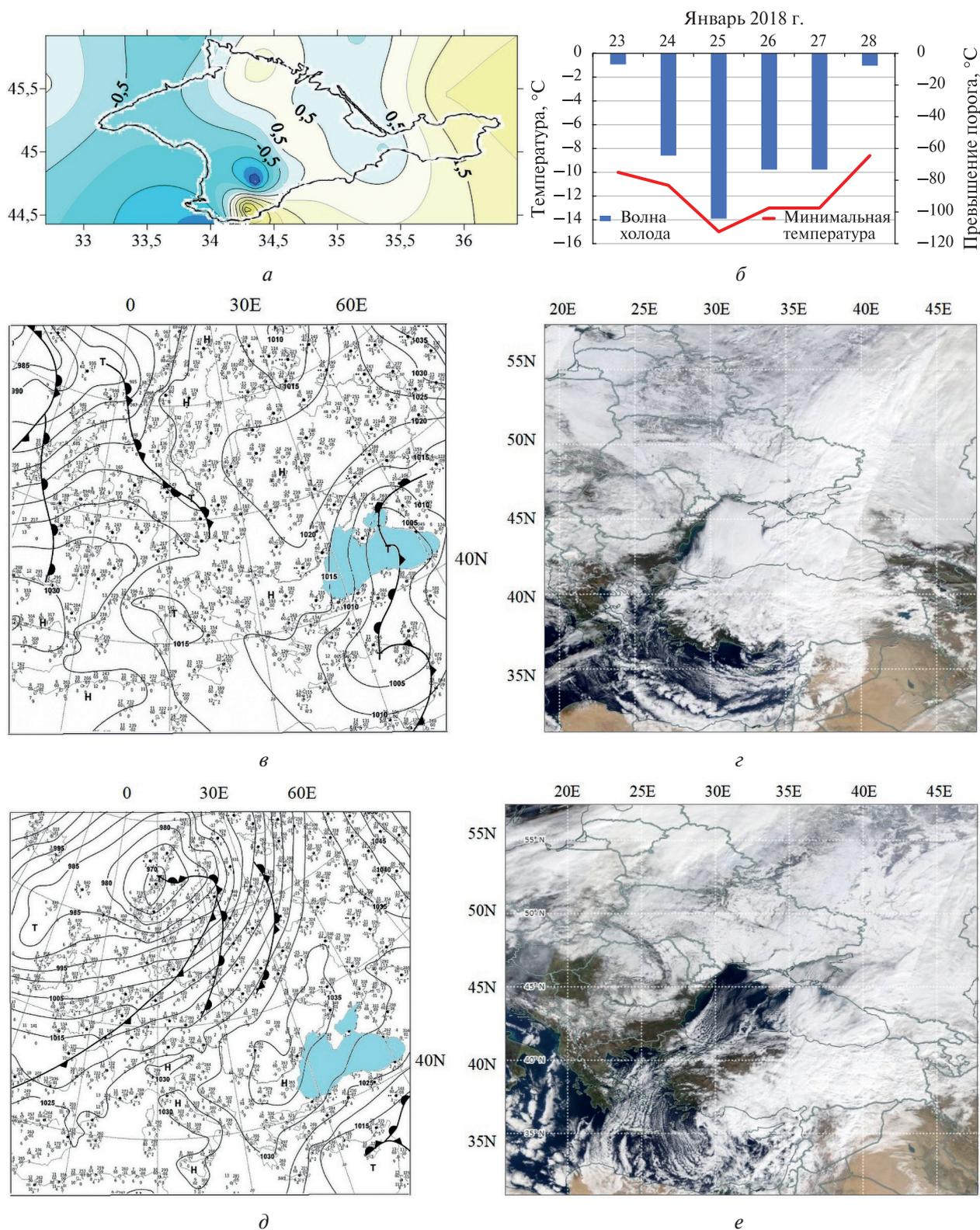


Рис. 6. Волна холода юго-западного направления (23–28.01.2018): а — начало волны холода (23.01.2018); б — суточные значения суммарного превышения порога холода и минимальные значения температуры воздуха; в — карта приземного анализа (23.01.2018); г — спутниковый снимок MODIS/Terra (23.01.2018); д — карта приземного анализа (25.01.2018); е — спутниковый снимок MODIS/Terra (25.01.2018)

Для этой волны характерны два ярко выраженных температурных пика: (15.02.2011) $-15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (метеостанция Ай-Петри), (20.02.2011) $-10,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (метеостанция Ишунь). Начиная с 13.02.2011 Крымский полуостров находился в зоне действия обширного циклона с давлением в центре 985,0 гПа и большими барическими градиентами; с циклоном связана система фронтов, проходящих стадию окклюдирования (см. *рис. 5в*). В тыл циклона приходит заток холодной массы воздуха, связанной с антициклоном, с давлением в центре 1020,0 гПа. На спутниковом снимке (13.02.2011) после прохождения холодного фронта над территорией полуострова наблюдается безоблачная зона, которая сформирована затоком холодного воздуха (см. *рис. 5г*).

Учитывая, что холодный фронтальный раздел проходил южнее полуострова и находился над акваторией Чёрного моря, температура пришедшей воздушной массы была выше $-3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, что для большинства станций полуострова не превышает пороговых значений при определении волн холода. Поэтому начало волны холода (13.02.2011) зафиксировано только на станциях, находящихся в высокогорных районах и в южной части полуострова (Ай-Петри, Ангарский перевал, Алушта, Никита, Ялта). Дальнейшее усиление в центре антициклона атмосферного давления до 1030 гПа (15.02.2011) и распространение его на большую часть Европейской равнины привело к вторжению холодных воздушных масс. Конфигурация изобар такова, что вторжение холода на полуостров происходило с южного направления. На спутниковом снимке вся территория представлена малооблачной зоной с выраженным фронтальным разделом, где облачность холодного фронта имеет чёткую структуру в виде яркой широкой полосы с вкраплениями округлых ярких пятен с резко очерченными краями (см. *рис. 5д, е*).

Волны холода юго-западного направления

Волна холода юго-западного направления длительностью шесть дней наблюдалась в регионе в период 23.01–28.01.2018 (*рис. 6а*, см. с. 358), для неё характерен один пик холода (25.01.2018) (см. *рис. 6б*). Волна холода связана с прохождением над Чёрным морем с юго-запада двучетровой депрессии с развитой системой фронтов с давлением в центре 1005 гПа (23.01.2018) (см. *рис. 6в*).

В тылу циклона сформировалось малоградиентное поле повышенного давления 1020 гПа, в связи с чем зафронтальная область над Крымским полуостровом и юго-западнее его представлена малооблачной зоной. Заток холодного воздуха на полуостров связан с вторжением более холодных воздушных масс с юго-восточной части Средиземного моря и полуострова Малой Азии (см. *рис. 6г*). Волна холода юго-западного направления достигла максимальных значений 25.01.2018. Дальнейшее усиление антициклона (25.01.2018), увеличение атмосферного давления в его центре до 1035 гПа и распространение на весь Причерноморский регион (см. *рис. 6д*) способствовали установлению малооблачной погоды над юго-западной частью Чёрного моря, с температурой воздуха ниже пороговых значений (см. *рис. 6е*).

Выводы

Проведён сравнительный анализ ситуаций формирования приземных волн холода по данным наземных измерений, синоптическим картам погоды и спутниковым изображениям, полученным с помощью спектрорадиометра MODIS/Terra.

Спутниковые изображения облачного покрова позволяют выявить проходящие фронтальные разделы и формирование в их тылу безоблачных или малооблачных зон, указывающих на вторжение холодных воздушных масс. В случае волн холода северо-восточного направления на побережье Чёрного моря по данным MODIS наблюдаются безоблачные зоны с выраженным направлением стока. Данные волны свидетельствуют о значительной скорости ветра в этих зонах, что характерно для Черноморской и Новороссийской боры в зимний

период. Сравнительный анализ приземных синоптических карт и данных MODIS показал, что во всех случаях фиксации на территории Крымского полуострова волн холода различного генезиса наблюдается прохождение фронтальных разделов и установление над регионом безоблачной антициклональной зоны, с которой связан зафронтальный заток холодных масс воздуха. Ориентация изобар в пограничной области между циклоном и антициклоном вызывает направление вторжения холодных масс воздуха, на спутниковых снимках эта область всегда безоблачна.

Учитывая, что приземные волны холода фиксируются по факту поступления на территорию полуострова холодных воздушных масс, полученные в статье результаты могут быть использованы при уточнении методик прогноза экстремальных температурных явлений, применяемых в практике. Систематизация волн холода даёт возможность оценки рисков в сельскохозяйственной отрасли и коррекции работы урбанистических территории. Для жителей и гостей полуострова будет крайне необходимым заблаговременное уведомление о неблагоприятном воздействии холода в целом и кратковременных экстремальных понижениях температуры воздуха.

Работа выполнена в рамках темы № FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах» (шифр «Взаимодействие океана и атмосферы»).

Литература

1. Баянкина Т. М., Данова Т. Е. Циклогенез Средиземноморско-Черноморского региона по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 231–239. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-231-239.
2. Бедрицкий А. И., Коршунов А. А., Шаймарданов М. З. Опасные гидрометеорологические явления и их влияние на экономику России. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2001. 36 с.
3. Галеев А. А., Ершов Д. В., Лупян Е. А. и др. Организация блока обработки, хранения и представления данных прибора MODIS для системы мониторинга лесных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 115–125.
4. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
5. Горбунов Р. В., Горбунова Т. Ю., Калиновский П. С. и др. Роль циркуляции атмосферы в изменении температуры воздуха на территории Крымского полуострова в XX веке – начале XXI века // Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 2016. № 580. С. 175–198.
6. Данова Т. Е. Волны жары и холода на территории Крымского полуострова и здоровье населения // Экология человека. 2023. Т. 30. № 9. С. 681–694. DOI: 10.17816/humeco604353.
7. Ергина Е. И., Жук В. О. Пространственно-временная изменчивость климата зимних сезонов в Крыму // Учёные записки Крымского федер. ун-та им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4 (70). № 1. С. 104–121.
8. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Пространственно-временная структура ялтинской боры // Морской гидрофиз. журн. 2015. № 3. С. 3–14. DOI: 10.22449/0233-7584-2015-3-3-14.
9. Ефимов В. В., Шокуров М. В., Яровая Д. А., Хейн Д. Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем // Морской гидрофиз. журн. 2009. № 4. С. 19–33.
10. Ефимов В. В., Комаровская О. И., Баянкина Т. М. Временные характеристики и синоптические условия образования экстремальной новороссийской боры // Морской гидрофиз. журн. 2019. Т. 35. № 5. С. 409–422. DOI: 10.22449/0233-7584-2019-5-409-422.
11. Кононова Н. К. Циркуляция атмосферы в Европейском секторе Северного полушария в XXI веке и колебания температуры в Крыму // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10. № 1. С. 633–639.
12. Оценка риска и ущерба от климатических изменений, влияющих на повышение уровня заболеваемости и смертности в группах населения повышенного риска: методические рекомендации МР 2.1.10.0057-12. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 48 с.
13. Ревич Б. А., Григорьева Е. А. Риски здоровью российского населения от погодных экстремумов в начале XXI в. Часть 1. Волны жары и холода // Проблемы анализа риска. 2021. Т. 18. № 2. С. 12–33. DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-2-12-33.

14. Толмачева Н. И. Космические методы исследований в метеорологии. Интерпретация спутниковых изображений. Пермь: Пермский гос. нац. исслед. ун-т, 2012. 208 с.
15. Barnett A. G., Hajat S., Gasparrini A., Rocklöv J. Cold and heat waves in the United States // *Environmental Research*. 2012. V. 112. P. 218–224. DOI: 10.1016/j.envres. 2011.12.010.
16. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 893 p.
17. Justice C. O., Townshend J. R. G., Markham B. L. Cover MODIS spatial resolution study // *Intern. J. Remote Sensing*. 1987. V. 8. Iss. 8. P. 1119–1121. DOI: 10.1080/01431168708954759.
18. Klein Tank A., Wijngaard J., van Engelen A. Climate of Europe: assessment of observed daily temperature and precipitation extremes. De Bilt, Netherlands: Royal Dutch Meteorological Institute, 2002. 36 p.
19. Lionello P., Dalan F., Elvini E. Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO₂ climate scenarios // *Climate Research*. 2002. V. 22. P. 147–159.
20. Piticar A., Croitoru A.-E., Ciupertea F.-A., Harpa G.-V. Recent changes in heat waves and cold waves detected based on excess heat factor and excess cold factor in Romania // *Intern. J. Climatology*. 2017. V. 38. Iss. 4. P. 1777–1793. DOI: 10.1002/joc.5295.
21. Rahmstorf S., Coumou D. Increase of extreme events in a warming world // *Proc. National Academy of Sciences*. 2011. V. 108. No. 44. P. 17905–17909. DOI: 10.1073/pnas.1101766108.
22. Trigo I. F., Bigg G. R., Davies T. D. Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean // *Monthly Weather Review*. 2002. V. 130. P. 549–569.
23. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al. MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1989. V. 27. No. 2. P. 145–153. DOI: 10.1109/36.20292.
24. Sheridan S. C., Allen M. J. Temporal trends in human vulnerability to excessive heat // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. No. 4. Article 043001.

Ground-level cold waves over the Crimean Peninsula based on ground and satellite observations

T. E. Danova, T. M. Bayankina

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mails: danova8@mail.ru, bayankina_t@mail.ru

We identified and interpreted spatiotemporal changes in cold waves of various genesis over the Crimean Peninsula using comparative analysis of satellite data from MODIS/Terra spectroradiometer, synoptic information and data from a discrete network of meteorological observations. To define cold waves, we used 3rd percentile thresholds for the annual distribution of minimum and mean daily temperature. We found that based on direction, cold waves in the region divide into five groups: three groups with a northern component (76 %), two groups with a southern component (24 %). All the groups are characterized by common patterns: a cold wave formation is preceded by a cyclone and associated frontal sections, the duration and intensity of subsequent cold influx depend on the orientation of the zone of baric gradients and their magnitude. We identified the most powerful cold waves associated with the invasion from the northeastern direction onto the Black Sea coast, for which cloudless zones with a pronounced flow direction are observed, according to MODIS data. These zones indicate significant wind speeds, typical of the Black Sea and Novorossiysk boras in winter.

Keywords: Black Sea region, Crimean Peninsula, cold waves, MODIS/Terra satellite images

Accepted: 02.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-349-363

References

1. Bayankina T. M., Danova T. E., Cyclogenesis in the Mediterranean-Black Sea region from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 231–239 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-231-239.
2. Bedritsky A. I., Korshunov A. A., Shaimardanov M. Z., *Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya i ikh vliyaniye na ehkonomiku Rossii* (Dangerous hydrometeorological phenomena and their impact on the Russian economy), Obninsk: VNIIGMI-MTSD, 2001, 36 p. (in Russian).
3. Galeev A. A., Ershov D. V., Loupian E. A. et al., Organization of a data processing, storage and presentation unit for the MODIS device for a forest fire monitoring system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Iss. 1, V. 1, pp. 115–125 (in Russian).
4. German M. A., *Kosmicheskie metody issledovaniya v meteorologii* (Space methods of research in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985, 351 p. (in Russian).
5. Gorbunov R. V., Gorbunova T. Yu., Kalinovsky P. S. et al., Role of atmospheric circulation in air temperature changes on the Crimean Peninsula in the XX century – beginning of XXI century, *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 2016, No. 580, pp. 175–198 (in Russian).
6. Danova T. E., Heat and cold waves on the Crimean Peninsula and their impact on population health, *Ekologiya cheloveka*, 2023, V. 30, No. 9, pp. 681–694 (in Russian), DOI: 10.17816/humeco604353.
7. Yergina E. I., Zhuk V. O., Space-time variability of climate of winter seasons in Crimea, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2018, V. 4 (70), No. 1, pp. 104–121 (in Russian).
8. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Spatial-temporal structure of bora in Yalta, *Physical Oceanography*, 2015, No. 3, pp. 3–13, DOI: 10.22449/1573-160X-2015-3-3-13.
9. Efimov V. V., Shokurov M. V., Yarovaya D. A., Hein D., Statistics of mesoscale cyclonic Eddies over the Black Sea, *Physical Oceanography*, 2009, V. 19, No. 4, pp. 211–224, DOI: 10.1007/s11110-009-9052-8.
10. Efimov V. V., Komarovskaya O. I., Bayankina T. M., Temporal characteristics and synoptic conditions of extreme bora formation in Novorossiysk, *Physical Oceanography*, 2019, V. 26, No. 5, pp. 361–373, DOI: 10.22449/1573-160X-2019-5-361-373.
11. Kononova N. K., Atmospheric circulation in the European sector of the Northern Hemisphere in the 21st century and temperature fluctuations in Crimea, *Geopolitika i ehkogeodinamika regionov*, 2014, V. 10, No. 1, pp. 633–639 (in Russian).
12. *Otsenka riska i ushcherba ot klimaticheskikh izmenenii, vliyayushchikh na povyshenie urovnya zabolevayemosti i smertnosti v gruppakh naseleniya povyshennogo riska: metodicheskie rekomendatsii MR 2.1.10.0057-12* (Assessment of the risk and damage from climate change affecting the increase in morbidity and mortality in high-risk populations: Methodological recommendations MR 2.1.10.0057-12), Moscow: Federal'nyi tsentr gigieny i ehpidemiologii Rospotrebnadzora, 2012, 48 p. (in Russian).
13. Revich B. A., Grigorieva E. A., Health risks to the Russian population from weather extremes in the beginning of the XXI century. Part 1. Heat and cold waves, *Issues of Risk Analysis*, 2021, V. 18, No. 2, pp. 12–33 (in Russian), DOI: 10.32686/1812-5220-2021-18-2-12-33.
14. Tolmacheva N. I., *Kosmicheskie metody issledovaniya v meteorologii. Interpretatsiya sputnikovykh izobrazhenii* (Space research methods in meteorology. Interpretation of satellite images), Perm: Permskii gosudarstvennyi natsional'nyi issledovatel'skii universitet, 2012, 208 p. (in Russian).
15. Barnett A. G., Hajat S., Gasparrini A., Rocklöv J., Cold and heat waves in the United States. *Environmental Research*, 2012, V. 112, pp. 218–224, DOI: 10.1016/j.envres.2011.12.010.
16. Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A., *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 893 p.
17. Justice C. O., Townshend J. R. G., Markham B. L., Cover MODIS spatial resolution study, *Intern. J. Remote Sensing*, 1987, V. 8, Iss. 8, pp. 1119–1121, DOI: 10.1080/01431168708954759.
18. Klein Tank A., Wijngaard J., van Engelen A., *Climate of Europe: assessment of observed daily temperature and precipitation extremes*, De Bilt, Netherlands: Royal Dutch Meteorological Institute, 2002, 36 p.
19. Lionello P., Dalan F., Elvini E., Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO₂ climate scenarios, *Climate Research*, 2002, V. 22, pp. 147–159.
20. Piticar A., Croitoru A.-E., Ciupertea F.-A., Harpa G.-V., Recent changes in heat waves and cold waves detected based on excess heat factor and excess cold factor in Romania, *Intern. J. Climatology*, 2017, V. 38, Iss. 4, pp. 1777–1793, DOI: 10.1002/joc.5295.
21. Rahmstorf S., Coumou D., Increase of extreme events in a warming world, *Proc. National Academy of Sciences*, 2011, V. 108, No. 44, P. 17905–17909, DOI: 10.1073/pnas.1101766108.
22. Trigo I. F., Bigg G. R., Davies T. D., Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *Monthly Weather Review*, 2002, V. 130, pp. 549–649.

23. Salomonson V. V., Barnes W. L., Maymon P. W. et al., MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1989, V. 27, No. 2, pp. 145–153, DOI: 10.1109/36.20292.
24. Sheridan S. C., Allen M. J., Temporal trends in human vulnerability to excessive heat, *Environmental Research Letters*, 2018, V. 13, No. 4, Article 043001.