

Мезомасштабный вихрь над озером Убсу-Нур (Увс-Нуур): анализ и численное моделирование

Н. В. Вазаева^{1,2}, И. А. Репина^{1,3}, А. А. Шестакова¹, Г. Ганбат⁴

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: vazaevanv@ifaran.ru

² *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана*
Москва, 105005, Россия

³ *Научно-исследовательский вычислительный центр*
МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия

⁴ *Германо-монгольский институт ресурсов и технологий*
Улан-Батор, 15160, Монголия

На основе спутниковых данных и по результатам численного исследования на модели WRF-ARW проанализированы случаи мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур (Увс-Нуур), Монголия, в ноябре 2016 г. В этот промежуток времени, когда поверхность озера ещё не полностью покрывалась льдом, несколько дней наблюдался устойчивый мезомасштабный вихрь — яркое проявление озёрного эффекта. Независимо от начальных данных адаптированная под описанный случай модель хорошо воспроизводила время и местоположение наблюдаемого вихря, правильно отображая структуру облаков и временной ход метеорологических параметров вблизи поверхности, хотя и несколько менее точно воспроизводила осадки. Эксперименты по чувствительности выявили роль тёплой поверхности озера и орографии в образовании и усилении вихрей. Орография близ Убсу-Нур достаточна для создания благоприятных условий для местной ветровой и бризовой циркуляции, и она в значительной степени формировала неустойчивую температурную стратификацию за счёт частичного блокирования набегающего потока, играя преимущественную роль в формировании вихря за счёт орографически индуцированной конвергенции.

Ключевые слова: мезомасштабный вихрь, численное моделирование, WRF-ARW, Убсу-Нур, спиральность

Одобрена к печати: 31.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317

Введение

Над свободными ото льда озёрами в холодное время года можно наблюдать мезомасштабные вихри — мезоциклоны. Исследование и анализ таких явлений чрезвычайно актуальны, поскольку они приводят к значительному увеличению интенсивности осадков, а также возможно появление других экстремальных погодных событий на побережье, как, например, было показано для американских Великих озёр в работе (Laird, Kristovich, 2004) или оз. Байкал в публикации (Shestakova, Repina, 2021).

Над крупными озёрами, которые в силу своих размеров и глубины не покрываются льдом в конце осени — начале зимы, вследствие озёрного эффекта формируются мезомасштабные (в зависимости от размера озера примерно от 10 до 100 км (Laird, 1999)) циркуляции. По механизму образования они схожи с таковыми для полярных мезоциклонов и тропических циклонов: потоки скрытого тепла за счёт конденсации в облаках (Веземская, Степаненко, 2016; Charney, Eliassen, 1964) и поверхностный теплообмен за счёт турбулентных потоков тепла при увеличении скорости ветра в циклоне (Emanuel, Rotunno, 1989). Основную роль для вихрей над озером играют турбулентные тепловые потоки (Laird, 1999), образование обычно происходит при слабом ветре и слабом вертикальном сдвиге ветра (Forbes, Merritt, 1984), при возникновении в зимнее время глубокой конвекции. Подробно анализ основных источников завихренности для мезомасштабных вихрей над озером был проведён в работе (Shestakova,

Репина, 2021). На примере оз. Байкал показано, что помимо перечисленных выше механизмов большое влияние в качестве инициирующего фактора имеет орография и местные ветры. Обнаруженные на космических снимках густые облачные скопления не были вызваны вынужденным крупномасштабным подъёмом воздуха на атмосферных фронтах или свободной конвекцией (как это обычно бывает летом в средних широтах). Была выявлена другая движущая сила для инициации конвекции — вертикальные движения в центре вихря из-за схождения масс. В свою очередь, первоначальная массовая конвергенция обеспечивалась не глубокой конвекцией над озером (например, за счёт выделения теплоты конденсации), поскольку глубокая конвекция была вторичной по отношению к вихрю, а орографией. Для подтверждения этой гипотезы были проведены численные эксперименты на модели без орографии, в которой мезоциклон отсутствовал. В настоящем исследовании такой эксперимент также будет проведён для оз. Убсу-Нур.

Солёное оз. Убсу-Нур находится на севере Монголии на границе с Российской Федерацией, в гористой местности и является крупным замерзающим мелководным водоёмом (площадь 3350 км²). Климат в бассейне озера резко-континентальный с малым годовым количеством осадков (143 мм) и выраженным годовым ходом температуры воздуха (средняя температура июля плюс 20 °С, января — минус 32 °С).

Метеорологические станции и посты в окрестностях озера практически отсутствуют — ближайшая метеорологическая станция Улангом расположена на расстоянии более 20 км. Обнаруженный нами по спутниковым данным мезомасштабный вихрь, ежегодно формирующийся над оз. Убсу-Нур в осенний период (Репина и др., 2021, Степаненко и др., 2019), оказывает существенное влияние на формирование ледяного покрова и, вероятно, по аналогии с Великими Американскими озёрами (Forbes, Merritt, 1984), приносит экстремальные осадки, но найти даже географическое описание этого явления нам не удалось, при том что его повторяемость и локализация гораздо более явные, чем у подобных явлений на Американских озёрах. Недостаток информации об опасных последствиях этого события связан, прежде всего, с отсутствием поселений в регионе озера.

Одна из целей данной работы состоит в оценке качества моделирования озёрных циркуляций над оз. Убсу-Нур с использованием мезомасштабной модели и при разных начальных и граничных условиях, что позволит улучшить качество прогноза подобных явлений. Показано, что для прогноза возникновения и идентификации такого циклона удобно использовать спиральность восходящих движений (*англ.* updraft helicity). Мы применяли модель WRF-ARW (*англ.* Weather Research and Forecasting — Advanced Research WRF), хорошо зарекомендовавшую себя при прогнозировании подобных событий в других регионах. На примере одного случая проанализировано влияние орографии и температуры поверхности озера на механизмы образования мезоциклона над Убсу-Нуром. Чтобы дифференцировать влияние орографии и озёрного эффекта на формирование вихря, были проведены дополнительные эксперименты по чувствительности модели.

Данные и методы

В качестве основного источника данных об облачности для выявления мезомасштабной циркуляции над оз. Убсу-Нур использовались изображения спектрального радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Terra, Aqua, а также со спутников Sentinel-2A, Landsat-8. Изображения доступны по ссылкам <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> и <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>. Для численного моделирования мезомасштабных циркуляций была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF-ARW (использовались версии 4.1.1. и 4.1.3.) (Skamarock et al., 2019).

Моделирование проводилось для периода с 19 декабря по 30 ноября 2016 г., когда по спутниковым снимкам была обнаружена мезомасштабная конвективная ячейка. Расчётные области (*рис. 1*, см. с. 308) с вложенными сетками (540×540 км с шагом 9 км, 219×219 км

с шагом 3 км, 151×151 км с шагом 1 км) имели 38 вертикальных уровней до высоты 16 000 м со сгущением в пограничном слое. В качестве начальных и граничных данных использованы поля реанализа CFSR (*англ.* Climate Forecast System Reanalysis) NCEP (*англ.* National Centers for Environmental Prediction (Национальный центр экологических прогнозов) и поля реанализа ERA5. Для первой области использовалось спектральное смещение (*англ.* spectral nudging) под атмосферным пограничным слоем (АПС). В центре области расположено оз. Убсу-Нур — объект исследования. Включён дополнительный блок расчёта озёр. Для параметризации пограничного слоя применена схема Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL, для параметризации приземного слоя — схема Nakanishi and Niino PBL's surface layer scheme. RRTMG scheme (*англ.* Rapid Radiative Transfer Model for General, новая версия RRTM) и RRTMG short-wave выбраны для параметризации длинноволнового и коротковолнового излучения. Для параметризации облачности (внешняя область) выбрана схема Каина — Фритша (*англ.* Kain-Fritsch scheme). Для параметризации турбулентности принята схема простой диффузии с использованием двумерного метода (коэффициент K определяется только с использованием горизонтальной деформации). WRF Single-Moment 6-class scheme применена для параметризации микрофизики, Noah land-surface model — для параметризации параметров земной поверхности.

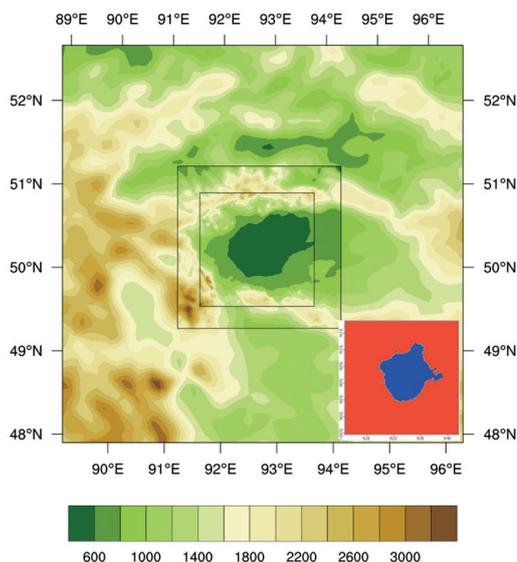


Рис. 1. Области моделирования, шаг сетки 9, 3, 1 км; цвет показывает высоту орографии (в метрах над уровнем моря). В правом нижнем углу изображена вложенная область моделирования с шагом 1 км с оз. Убсу-Нур — объектом исследования. Модель WRF-ARW, 19–30 ноября 2016 г.

Было проведено три численных эксперимента. В контрольном эксперименте (WRF-CFSv2) в качестве начальных и граничных условий использовался реанализ CFSv2 (*англ.* Climate Forecast System version 2) (Saha et al., 2011) с шагом по времени 6 ч. Второй эксперимент (названный WRF-ERA5) был проведён с реанализом ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017, ERA5) с временным шагом 3 ч. Значения температуры поверхности озера в этих двух реанализах в рассматриваемом случае сильно различались: в ERA5 температура оказалась ниже, чем в CFSv2, почти на 10 °C (рис. 2, см. с. 309). Таким образом, эти два эксперимента были направлены не только на выявление наилучшего источника исходных данных, но и в какой-то степени на демонстрацию роли тёплого озера (озёрного эффекта) в формировании обнаруженных мезомасштабных циркуляций.

Третий эксперимент (PLANE) отличался от WRF-ERA5 только тем, что высота орографии в обоих доменах была сильно сглажена до уровня моря. Сравнение экспериментов WRF-CFSv2, WRF-ERA5 и PLANE направлено на выявление роли орографии в формировании обнаруженных циркуляций.

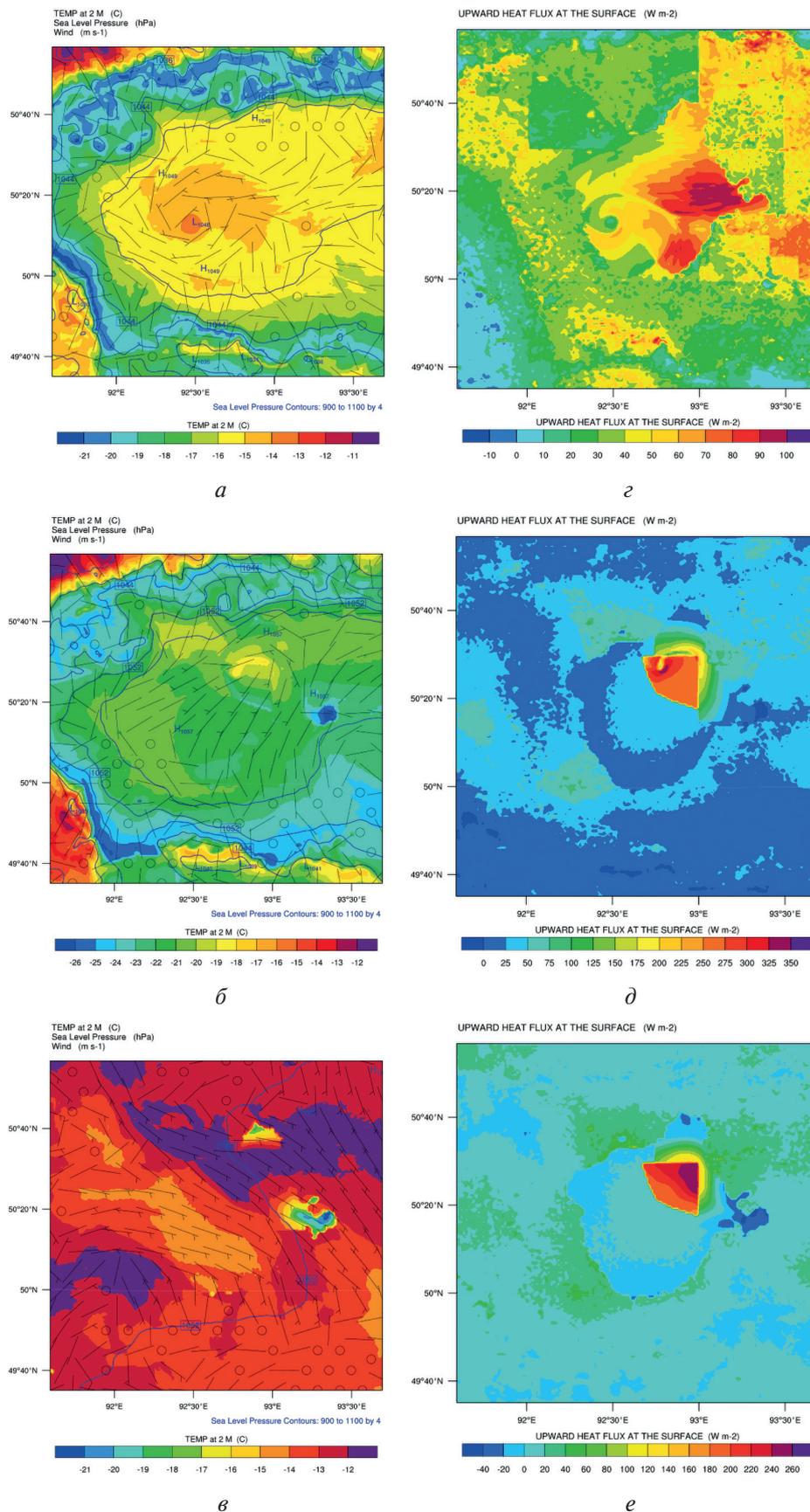


Рис. 2. Температура поверхности (°C, цвет), давление на уровне моря (гПа, линии), ветер (м/с, векторы) (*a–в*), поток тепла с поверхности (В/м²) (*г–е*) в 07:00 UTC (англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) 22 ноября 2016 г. из CFSv2 (*a*, *г*), ERA5 (*б*, *д*) и в эксперименте с отсутствием орографии (*в*, *е*). Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW

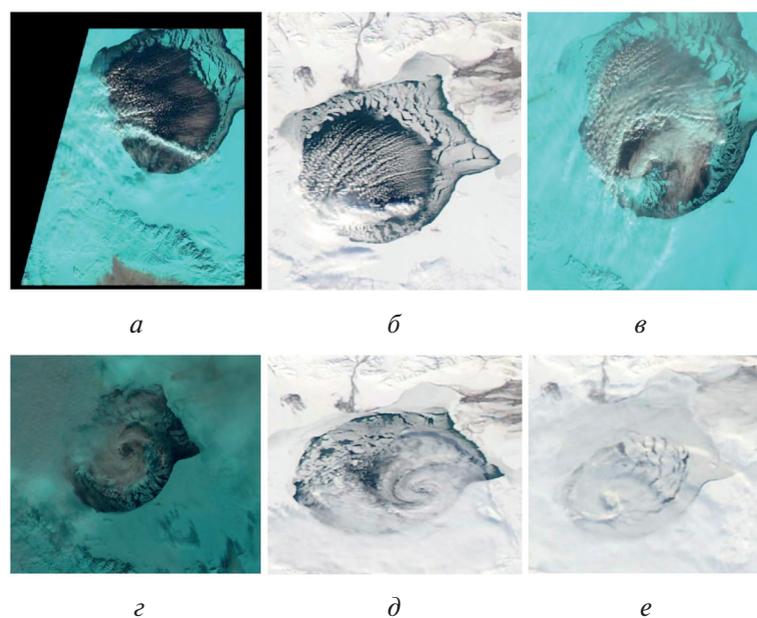


Рис. 3. Эволюция облачности над оз. Убсу-Нур: *а* — 19 ноября 2016 г., Sentinel-2A; *б* — 20 ноября 2016 г., MODIS; *в* — 22 ноября 2016 г., Sentinel-2A; *г* — 26 ноября 2016 г., Landsat-8; *д* — 28 ноября 2016 г., MODIS; *е* — 30 ноября 2016 г., MODIS

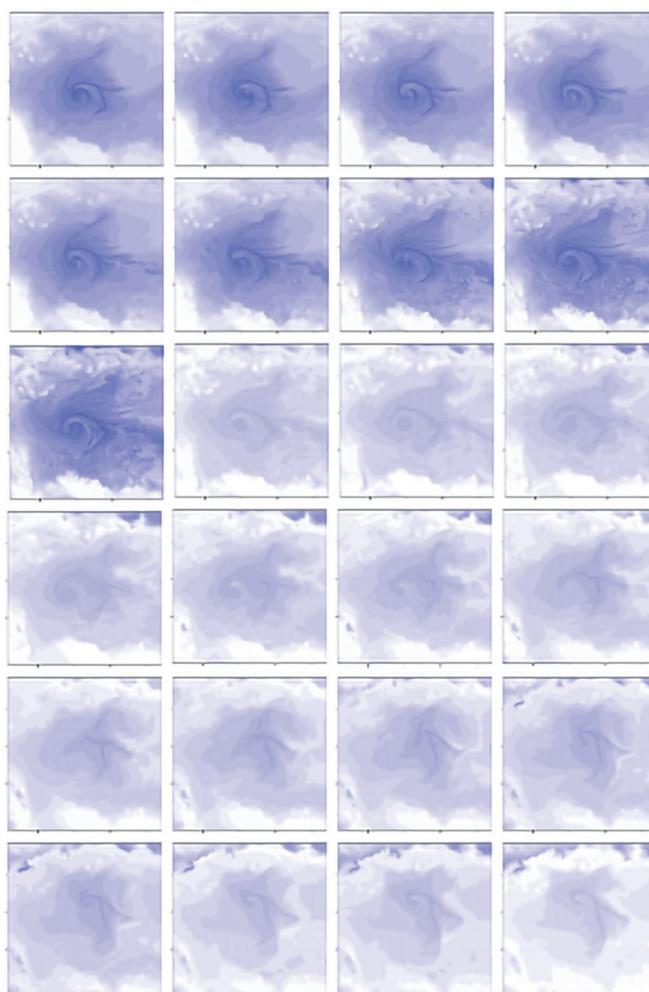


Рис. 4. Содержание водяного пара, вид сверху. Слева направо, сверху вниз — моменты времени 00:00–24:00 UTC, шаг — 1 час, 22 ноября 2016 г. Модель WRF 4.1.2. Шаг сетки — 1000 м. Реанализ CFSv2

На рис. 3 (см. с. 310) показаны спутниковые снимки 19, 20, 22, 26, 28, 30 ноября 2016 г. На этих изображениях видна эволюция конвективной ячейки, которая перманентно в это время образовывалась на Убсу-Нуром. Эволюция вихря по результатам численного моделирования в контрольном эксперименте WRF-CFSv2 показана на рис. 4 (см. с. 310) для 22 ноября 2016 г., где видна хорошая корреляция со спутниковым изображением. Ячейка над озером практически не двигалась, чему, предположительно, способствовала орография местности и округлая форма самого озера.

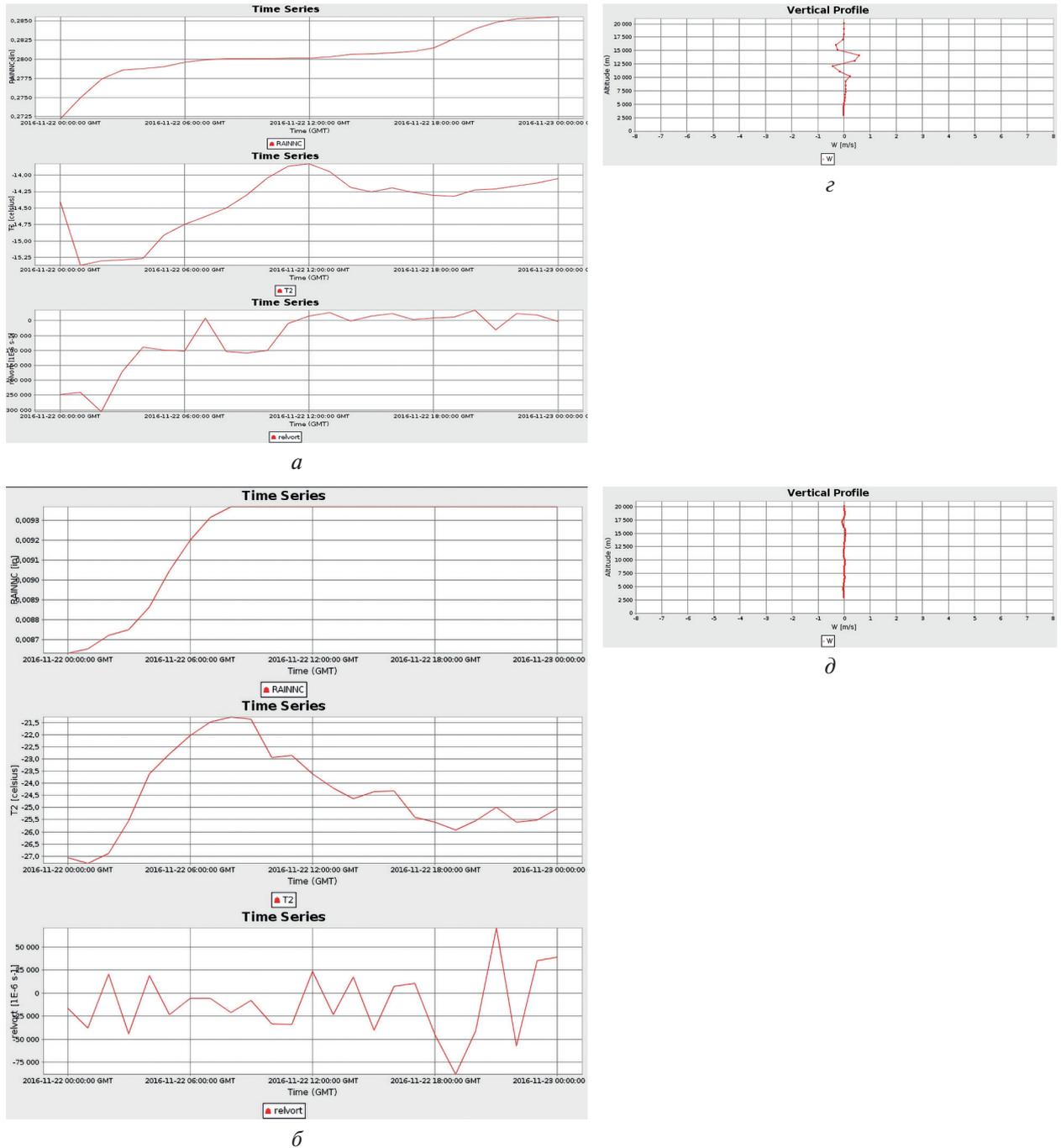


Рис. 5. Временные ряды (сверху вниз) суммарной интенсивности осадков, двухметровой температуры воздуха, относительной завихренности (а–в); профили вертикальной скорости (г–е). Эксперименты WRF-CFSv2 (а, г), WRF-ERA5 (б, д), PLANE (в, е). 22 ноября 2016 г. Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW (начало; окончание см. на с. 312)

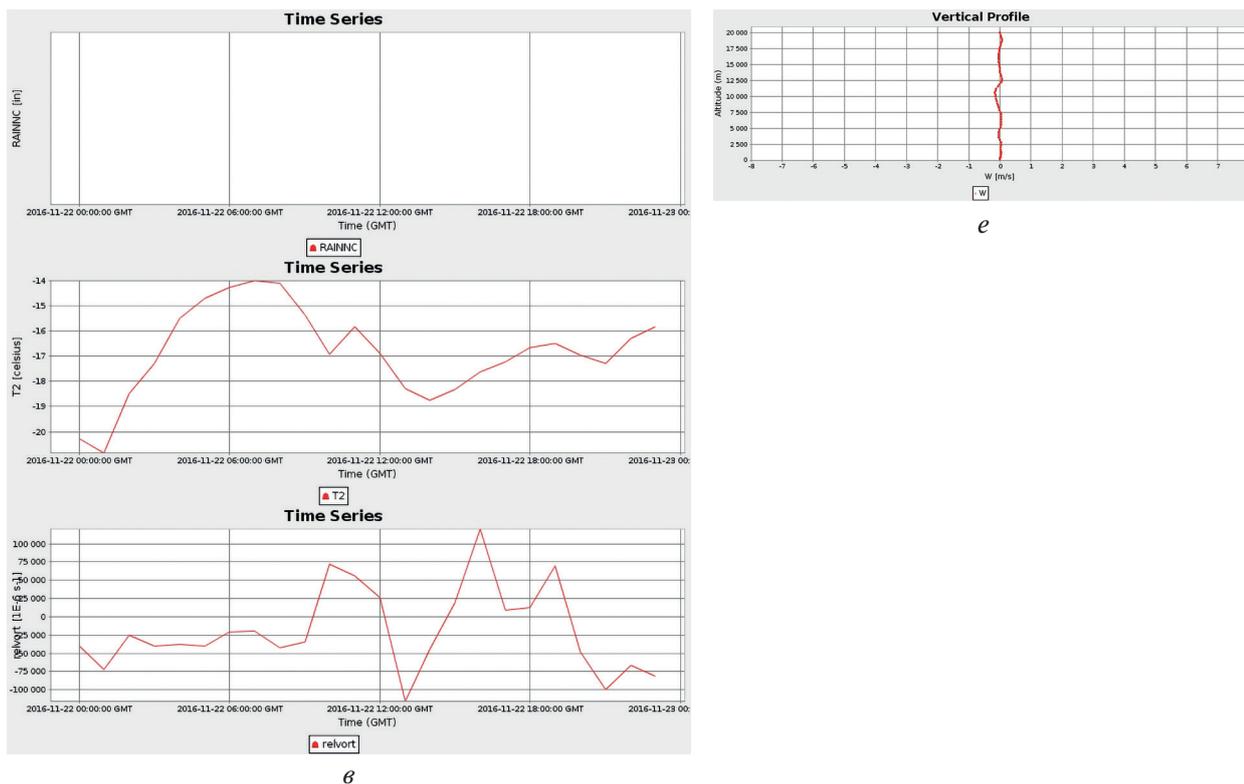


Рис. 5. Окончание (начало см. на с. 311)

Результаты моделирования. Динамика вихря в соответствии с данными наблюдений и результатами численных экспериментов на примере 22 ноября 2016 г.

Мезомасштабный вихрь, обнаруженный на спутниковом снимке 22 ноября, в контрольном эксперименте был полностью воспроизведён моделью, его положение близко к наблюдаемому (см. рис. 4). Вихревая облачная система имела форму «запятой» с сопутствующими ей днём «облачными улицами» у северного побережья, которые хорошо визуализируют действие часто возникающих на границе таких конвективных ячеек мезомасштабных когерентных структур, а в центре был виден «глаз» вихря. Выяснить время возникновения вихря по спутниковым наблюдениям с суточным временным разрешением затруднительно, поэтому анализ формирования мезомасштабной циркуляции и сопутствующих климатических явлений проведён по результатам численного моделирования. Именно мезомасштабный вихрь может объяснить снегопад от умеренного до сильного и кучево-дождевые облака, смоделированные в момент контрольного эксперимента WRF-CFSv2 (рис. 5, см. с. 311), поскольку в это время не было синоптических фронтов. По расчётам, суммарная интенсивность осадков в этом мезоциклоне достигала над озером 7 мм за 2 ч (см. рис. 5а).

Если обсуждать результаты моделирования экспериментов WRF-CFSv2 и WRF-ERA5 с использованием повторных анализов CFSv2 и ERA5 соответственно в качестве начальных и граничных условий для моделирования, то видно, что модель не воспроизводила мезоциклоны в их полном развитии в эксперименте WRF-ERA5: вихрь получался более слабым, предположительно вследствие меньшей температуры поверхности в эксперименте WRF-ERA5 (см. рис. 2), что в итоге повлияло на интенсивность вихря и осадков на побережье (см. рис. 5а, б для осадков, температуры и завихренности). Кроме того, присутствует смещение вихря относительно результатов контрольного эксперимента WRF-CFSv2 и спутниковых изображений, что хорошо заметно на рис. б (см. с. 313) по полю скорости ветра.

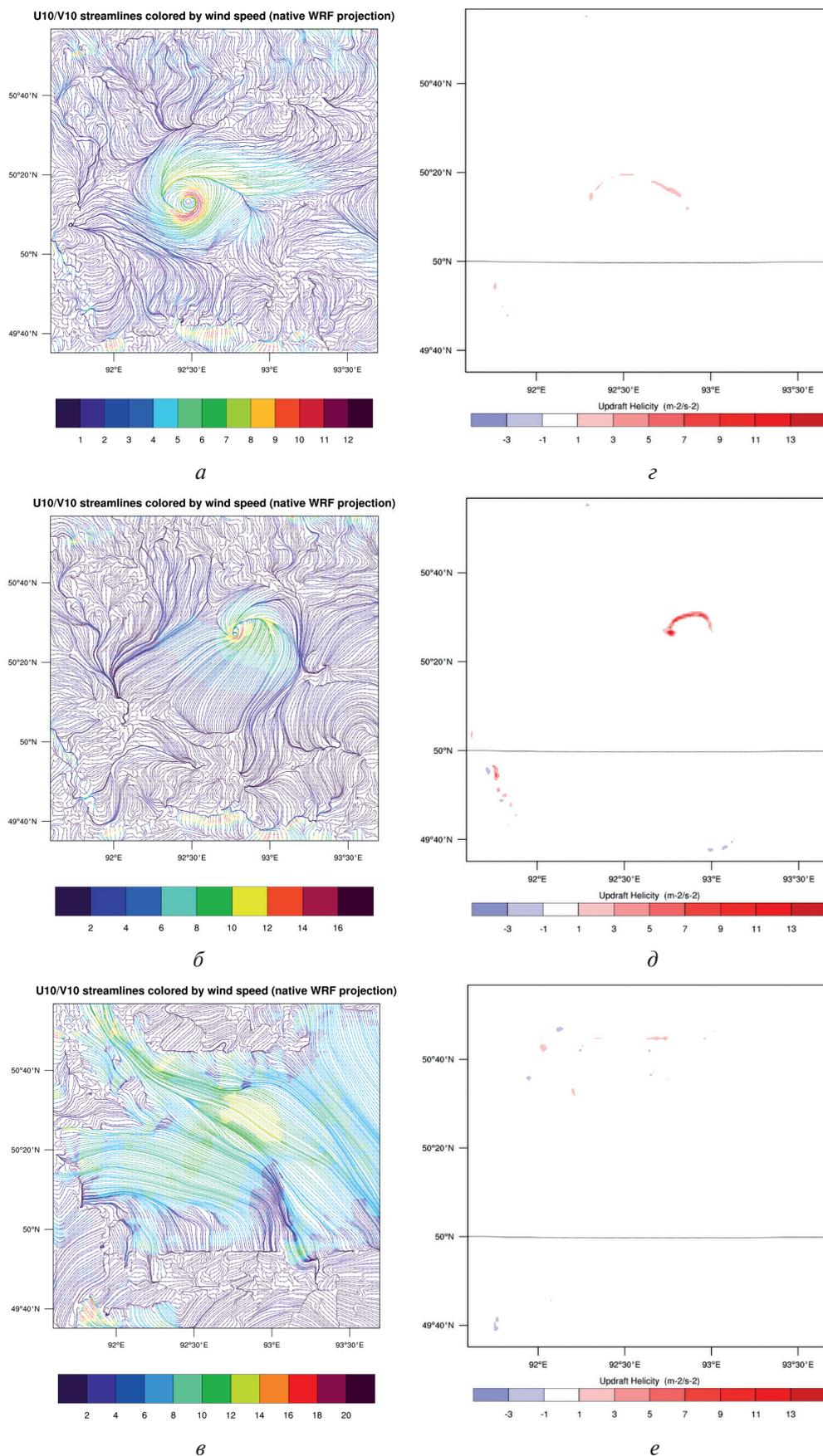


Рис. 6. Поле скорости ветра (*a–в*) и спиральность восходящих потоков (updraft helicity) (*z–e*) в экспериментах WRF-CFSv2 (*a, z*), WRF-ERA5 (*б, d*), PLANE (*в, e*). 22 ноября 2016 г., 07:00 UTC. Шаг сетки — 1000 м. Модель WRF-ARW

В то же время мезоциклон был воспроизведён в обоих случаях, тогда как для эксперимента с исключением орографии PLANE конвективную ячейку смоделировать не удалось, иногда лишь визуализировались слабые мелкомасштабные приповерхностные вихри, едва проявляющиеся в полях облаков (здесь не показано), ветра (см. *рис. 6*), температуры (см. *рис. 2*). Осадков в этом случае не прогнозировалось (см. *рис. 5в*), тепловой поток в обоих случаях для данных ERA5 (эксперименты WRF-ERA5 и PLANE) в значительной степени был ниже потока с использованием данных CFSv2 (см. *рис. 2*), что привело к отсутствию систем глубокой конвекции вообще и мезоциклона в частности в эксперименте PLANE. Таким образом, преимущество использования данных CFSv2 в нашем случае не вызывает сомнений. Визуализировать и идентифицировать вихри удобно с помощью спиральности (см. *рис. 6*).

Моделирование выявило лишь небольшие значения доступной потенциальной энергии конвекции (*англ.* Convective Available Potential Energy — CAPE) (не показано) в эксперименте WRF-CFSv2 в течение всего эпизода. Так как атмосферные фронты находились далеко от озера, когда возникали вихри, то вместо вынужденного крупномасштабного подъёма воздуха на атмосферных фронтах или свободной конвекции движущей силой были вертикальные движения в центре вихря из-за схождения масс в результате орографии. Для подтверждения этой гипотезы был использован эксперимент PLANE без орографии, в котором мезоциклон отсутствовал.

Влияние орографии проявлялось, прежде всего, в конвергенции потоков над озером, что порождало начальную сдвиговую завихренность. Особенности орографии на севере и юге Убсу-Нура сформировали ветры в орографически образованном коридоре (см. *рис. 6*). Высокие горы почти полностью блокировали холодный воздух, идущий с запада. Южнее, где высота гор уменьшается, отмечались юго-западные ветры склонового ураганного типа. Когда имели место мезоциклоны, скорость набегающего потока была выше, чем в другие дни, и характер ветров в эти два дня был очень схож: на востоке озера — умеренно сильный южный ветер, тот же ветер — на юге озера и узкие струи шелевых ветров в сочетании с умеренным северным ветром — в северной части. Такое сочетание местных ветров, «стекающее» к озеру, привело к возникновению вихря при столкновении этих орографических потоков. Сильный ветер выступает неблагоприятным фактором (при прочих равных условиях) для образования озёрных вихрей, так как фоновые течения нарушают бризовую циркуляцию. Отношение скорости потока к пути, пройденному потоком над озером (к расстоянию от берега до места возникновения вихря), находилось в пределах диапазона, характерного для озёрных вихрей (Laird, Kristovich, 2004). Орография, соответственно, значительно модулировала поле ветра, что видно по профилю вертикальной скорости (см. *рис. 5в, г*).

Заключение

Настоящее исследование, насколько нам известно, впервые касается анализа и моделирования озёрной конвекции и связанных с ней мезомасштабных циркуляций и конвективной ячейки на оз. Убсу-Нур. Генезис, развитие и идентификация мезоциклона в ноябре 2016 г. рассмотрены преимущественно на основе численного моделирования с использованием модели WRF-ARW. Конвергенция течения под влиянием местных орографических особенностей приводит к возникновению вертикальных движений за счёт сходимости (по уравнению неразрывности). Орография — основной триггер для генерации мезоциклона, хотя именно озёрный эффект (потоки тепла и влаги со свободной ото льда поверхности озера) позволяет развиваться вихрю и связанным с ним конвективным облакам. Численные эксперименты показали, что при уменьшении потоков тепла формируется более слабый вихрь, при отсутствии орографии мезоциклон не воспроизводится.

Хотя мы изучили только один эпизод, он типичен для периода формирования ледяного покрова, который в случае Убсу-Нура приходится на ноябрь — декабрь. Развитие этого мезоциклона можно описать следующим образом. Орография вокруг озера создаёт конвергенцию потока над ним за счёт конвергенции орографических потоков, в результате над озером образуется область пониженного давления и восходящих движений. Таким образом, этот вихрь

возникает из-за горизонтального сдвига ветра, а интенсификация восходящих движений в вихре возможна из-за неустойчивой температурной стратификации, формирующейся в значительной степени под влиянием орографии, а также из-за турбулентного теплообмена с поверхностью озера в нижнем слое. Внутри вихря, где, по расчётам, суммарная интенсивность осадков превышает 7 мм/2 ч, рост глубокой конвекции обусловлен вынужденными восходящими движениями за счёт схождения потоков.

Из-за большой разницы температуры между незамерзающим озером и холодной суши формируется бризовая циркуляция, которая способствует развитию местных ветров. Сильный ветер разрушает бризовую циркуляцию, поэтому при нём вероятность возникновения конвективной ячейки значительно снижается, как это произошло в эксперименте с искусственно сниженной орографией. Наконец, мы хотели бы подчеркнуть практический вывод, сделанный из результатов настоящей работы, в контексте увеличения точности прогноза и скорости идентификации мезомасштабной циркуляции. Модель WRF-ARW может быть рекомендована для регионального прогноза мезомасштабных циркуляций над озёрами в горном рельефе, результаты контрольного эксперимента с достаточной степенью точности верифицированы по спутниковым изображениям. Ключевыми параметрами, ответственными за формирование вихря, представляются температура поверхности озера и рельеф местности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-55-44028.

Литература

1. *Веземская П. С., Степаненко В. М.* Численное моделирование структуры и эволюции полярного мезоциклона в Карском море. Ч. 1. Проверка модели и оценки механизмов неустойчивости // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 69–81. DOI: 10.3103/S1068373916060078.
2. *Репина И. А., Степаненко В. М., Вазаева Н. В., Ганбат Г.* Мезомасштабные циркуляции на внутренних водоемах // *Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий: материалы 6-й Международ. научно-практ. конф.* 2021. Т. 2. С. 75–80.
3. *Степаненко В. М., Репина И. А., Ганбат Г., Даваа Г.* Моделирование ледового режима солёных озёр // *Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана*. 2019. Т. 55. № 1. С. 152–163. DOI: 10.31857/S0002-3515551152-163.
4. *Charney J. G., Eliassen A.* On the growth of the hurricane depression // *J. Atmospheric Sciences*. 1964. V. 21. No. 1. P. 68–75. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2).
5. *Emanuel K. A., Rotunno R.* Polar lows as Arctic hurricanes // *Tellus*. 1989. V. 41A. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v41i1.11817>.
6. *Forbes G. S., Merritt J. H.* Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime // *Monthly Weather Review*. 1984. V. 112. No. 2. P. 377–381. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVOTGL>2.0.CO;2).
7. *Laird N. F.* Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes // *Monthly Weather Review*. 1999. V. 127. No. 6. P. 1137–1141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2).
8. *Laird N. F., Kristovich D. A. R.* Comparison of Observations with Idealized Model Results for a Method to Resolve Winter Lake-Effect Mesoscale Morphology // *Monthly Weather Review*. 2004. V. 132. No. 5. P. 1093–1103. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2).
9. *Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Peña M., van den Dool H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E.* NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products // *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory*. 2011. 61 p. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
10. *Shestakova A. A., Repina I. A.* Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study // *Russian J. Earth Sciences*. 2021. V. 21. Art. No. ES5001. 19 p. DOI: 10.2205/2021ES000763.
11. *Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Zh., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X.* A description of the advanced research WRF model version 4. Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, 2019. 145 p. DOI: 10.5065/1dfh-6p97.

Mesoscale vortex over Uvs-Nuur: analysis and numerical simulation

N. V. Vazaeva^{1,2}, I. A. Repina^{1,3}, A. A. Shestakova¹, G. Ganbat⁴

¹ *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mail: vazaevanv@ifaran.ru

² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia*

³ *Research Computing Center of Lomonosov Moscow State University*
Moscow 119991, Russia

⁴ *German-Mongolian Institute for Resources and Technology*
Ulaanbaatar 15160, Mongolia

On the basis of satellite data and the results of a numerical simulation with the WRF-ARW model, cases of mesoscale circulation over Lake Uvs-Nuur, Mongolia, in November 2016 were analyzed. During this period of time, when the surface of the lake was not yet completely covered with ice, a stable mesoscale vortex was observed for several days – a clear evidence of the lake effect. Regardless of the initial data, the adapted model reproduced the time and location of the observed vortex with a good accuracy, correctly representing the structure of clouds and the time course of meteorological parameters near the surface, although it reproduced precipitation somewhat less accurately. Sensitivity experiments revealed the role of the warm lake surface and orography in the formation and enhancement of vortex. The orography near Uvs-Nuur is sufficient to create favorable conditions for local wind and breeze circulation, and it largely formed unstable temperature stratification due to partial blocking of the oncoming flow, playing a predominant role in the genesis of the vortex due to orographically induced convergence.

Keywords: mesoscale vortex, numerical simulation, WRF-ARW, Uvs-Nuur, helicity

Accepted: 31.07.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-306-317

References

1. Verezemskaya P. S., Stepanenko V. M., Numerical simulation of the structure and evolution of a polar mesocyclone over the Kara Sea. Pt. 1. Model validation and estimation of instability mechanisms, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, Vol. 41, No. 6, pp. 425–434, DOI:10.3103/S1068373916060078.
2. Repina I. A., Stepanenko V. M., Vazaeva N. V., Ganbat G., Mesoscale circulation in inner water body, *Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* (Fundamental and Applied Aspects of Geology, Geophysics and Geocology Using Modern Information Technologies), Proc. 6th Intern. Scientific and Practical Conf., 2021, Vol. 2, pp. 75–80 (in Russian).
3. Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G., Numerical simulation of ice cover of saline lakes, *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 129–138, DOI: 10.1134/S0001433819010092.
4. Charney J. G., Eliassen A., On the growth of the hurricane depression, *J. Atmospheric Sciences*, 1964, Vol. 21, No. 1, pp. 68–75, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0068:OTGOTH>2.0.CO;2).
5. Emanuel K. A., Rotunno R., Polar lows as Arctic hurricanes, *Tellus*, 1989, Vol. 41A, pp. 1–17, DOI: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v41i1.11817>.
6. Forbes G. S., Merritt J. H., Mesoscale vortices over the Great Lakes in wintertime, *Monthly Weather Review*, 1984, Vol. 112, No. 2, pp. 377–381, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0377:MVO TGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0377:MVO TGL>2.0.CO;2).
7. Laird N. F., Observation of coexisting mesoscale lake-effect vortices over the western Great Lakes, *Monthly Weather Review*, 1999, Vol. 127, No. 6, pp. 1137–1141, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1137:OOCMLE>2.0.CO;2).
8. Laird N. F., Kristovich D. A. R., Comparison of Observations with Idealized Model Results for a Method to Resolve Winter Lake-Effect Mesoscale Morphology, *Monthly Weather Review*, 2004, Vol. 132, No. 5, pp. 1093–1103, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1093:COOWIM>2.0.CO;2).
9. Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H., Iredell M., Ek M., Meng J., Yang R., Peña M., van den Doo H., Zhang Q., Wang W., Chen M., Becker E.,

- NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products*, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory, 2011, 61 p., DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
10. Shestakova A. A., Repina I. A., Mesoscale vortex over Lake Baikal: A case-study, *Russian J. Earth Sciences*, 2021, Vol. 21, Art. No. ES5001, 19 p., DOI: 10.2205/2021ES000763.
 11. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Liu Zh., Berner J., Wang W., Powers J. G., Duda M. G., Barker D., Huang X., *A description of the advanced research WRF model version 4*, Boulder, CO, USA: National Center for Atmospheric Research, 2019, 145 p., DOI: 10.5065/1dfh-6p97.