

Научная статья

УДК 551.511.31:551.509.329

DOI: 10.31857/S0869769825030028

EDN: PLRGNS

Оценка параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России

Е.М. Вербицкая✉, С.О. Романский

Евгения Митрофановна Вербицкая

кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия

werbaem@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Станислав Олегович Романский

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток, Россия

khvrom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Аннотация. Прогнозирование местоположения возможного возникновения горных волн (ГВ), их интенсивности и вертикального развития – весьма актуальная задача обеспечения безопасности полетов воздушных судов. Это особенно важно в условиях полного отсутствия методов прогнозирования ГВ на территории РФ вообще и Дальневосточного региона в частности. Основной сложностью решения задачи прогнозирования ГВ является практически полное отсутствие наблюдений за ГВ и инструментальных измерений их параметров. В статье представлен подход к оценке степени соответствия прогнозируемых по данным численной модели прогноза погоды параметров ГВ (местоположения, интенсивности, вертикального развития и горизонтального распространения) реальным значениям, которые предлагается приближенно определять по космическим снимкам чечевицеобразной облачности (Sc и Ac lenticularis) и данным радиозондирования. Показано, что расчетные параметры ГВ, полученные по модели Weather Research and Forecasting (WRF) на сетке с горизонтальным шагом 1 км, близки к реальным. Обсуждается возможность калибровки значений параметров ГВ, рассчитанных по оперативной модели WRF на сетке с горизонтальным шагом 5 км, данными, рассчитанными на сетке с шагом 1 км.

Ключевые слова: горные волны, подветренные волны, метеорологические прогнозы для авиации, Дальний Восток

Для цитирования: Вербицкая Е.М., Романский С.О. Оценка параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 3. С. 16–28. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030028>

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы 1.4.4.2 Плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета на 2020–2024 годы.

Original article

Analysis of mountain waves' characteristics obtained by high-resolution numerical modeling on Eastern Siberia and Russian Far East

E.M. Verbitskaya, S.O. Romanskiy

Eugenia M. Verbitskaya

Candidate of Sciences in Geography, Leading Researcher

Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

werbaem@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5776-9736>

Stanislav O. Romanskiy

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher

Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute, Vladivostok, Russia

khvrom@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6613-6881>

Abstract. Forecasting of possible locations, intensity, vertical and horizontal propagation of mountain waves (MW) is one of the main problems to ensure flight safety. This is very important in the complete absence predictions' methods on the territory of Russia in generally and, especially, in Far-Eastern region. Main problem of the MW forecasting is almost complete absence of MW observations and instrumental measurement of their characteristics. In the article, approach to conformity assessment of simulated MW parameters (location, intensity, vertical and horizontal propagation) to real characteristics which are approximately determined by satellite images of lenticular clouds (Sc и Ac lenticularis) and atmospheric sounding is presented. It is shown that characteristics of simulated MW by the Weather Research and Forecasting model with grid spacing of 1 km are close to actual values. Possibilities to calibrate parameters of simulated MW calculated on the 5-km grid by values obtained on 1-km grid are discussed.

Keywords: mountain wave, lee wave, meteorological forecasts for aviation, Far East

For citation: Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O. Analysis of mountain waves' characteristics obtained by high-resolution numerical modeling on Eastern Siberia and Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(3):16–28. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825030028>

Funding. The work is supported as a part of the theme 1.4.2.2 of the Plan of research and technological works of Roshydromet for 2020–2024.

Введение

Горные волны (ГВ) – это одно из наиболее опасных для авиации атмосферных явлений [1]. Простого взгляда на физическую карту Восточной Сибири и Дальнего Востока России достаточно, чтобы понять, что здесь при устойчивой стратификации атмосферы горные волны [1–3] могут формироваться практически еже-

дневно, так как горная и холмистая местность занимает большую часть рассматриваемой территории. Следовательно, прогнозирование местоположения возможного возникновения ГВ, их интенсивности и вертикального развития – весьма актуальная задача для обеспечения безопасности полетов воздушных судов над рассматриваемой территорией. Кроме того, ГВ являются одной из причин возникновения шквалистых и даже ураганных ветров у земли, а также интенсивной турбулентности орографического происхождения в горной и холмистой местности [1–4].

В этой связи была поставлена задача разработки методов и технологии прогнозирования наличия и интенсивности ГВ на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России. Эта задача особенно важна в условиях полного отсутствия методов прогнозирования ГВ на территории России вообще и в Дальневосточном регионе в частности. Основной сложностью решения поставленной задачи является практически полное отсутствие наблюдений за горной волной и инструментальных измерений ее параметров. Горную волну невозможно наблюдать визуально, за исключением случаев, когда она порождает специфическую облачность чечевицеобразной формы. Параметры горной волны (длину волны, скорость вертикальных движений, высоту вертикального развития и ареалы горизонтального распространения) трудно измерить инструментально, и такие измерения не выполняются. К сожалению, и в бортовых сообщениях воздушных судов сведений о наличии и интенсивности ГВ практически нет. Это обстоятельство является основной причиной отсутствия методов прогнозирования ГВ, поэтому в рамках темы 1.4.2.2 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 годы авторами была разработана методология прогнозирования ГВ по данным численных моделей прогноза погоды (ЧПП) высокого пространственного разрешения [5].

Цель данной работы заключается в оценке параметров горных волн, рассчитанных по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России, на примере случая формирования горной волны от вулкана Алаид (о-в Атласова, Курильские острова) 9 марта 2021 г.

Материалы и методы исследования

В статье использованы снимки облачного покрова в окрестности влк. Алаид с комического аппарата (КА) “Aqua” (США), которые доступны в интерактивном веб-интерфейсе NASA Worldview (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), и геостационарного КА “Himawari-8” (Япония), представленные в JAXA Himawari Monitor (<https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index.html>).

Фактические данные о погоде вблизи влк. Алаид были получены с ближайшей станции радиозондирования атмосферы, расположенной в Северо-Курильске, примерно на расстоянии 45 км от вулкана.

Для оценки степени устойчивости стратификации атмосферы рассчитывался параметр Lifted Index [6] (LI), который представляет собой разность температур на изобарической поверхности 500 гПа, полученных с кривых стратификации и состояния. При значениях LI выше 6° полагается, что в данной точке атмосфера стратифицирована очень устойчиво.

Моделирование процесса образования и развития горных волн вблизи влк. Алаид было выполнено с использованием мезомасштабной негидростатической численной модели прогноза погоды Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (WRF-ARW) [7]. Численные эксперименты выполнялись по модели в конфигурации с двумя вложенными сетками,

центры которых расположены в точке с координатами 50,9° с.ш., 155,6° в.д. (о-в Атласова, влк. Алайд). Горизонтальный шаг по внешней сетке установлен в 3 км (666×666 узлов), по вложенной сетке – 1 км (664×664 узлов). Горизонтальный шаг сетки модели существенно влияет на качество моделирования динамики ГВ: так, согласно [4, 8–12], шаг сетки порядка 1 км позволяет обеспечить приемлемое качество моделирования. По вертикали в модели задан 51 уровень от поверхности Земли до высоты 50 гПа с наиболее подробным разрешением в планетарном пограничном слое. Шаг по времени при интегрировании модели по внешней сетке 15 с, по внутренней сетке – 5 с. В качестве начальных и граничных данных для внешней сетки использованы прогнозы модели Global Forecasting System (NCEP, США) разрешением 0,5° и дискретностью 6 ч. В модели использовалась параметризация микрофизических процессов по схеме Томпсона. Процессы в приземном и планетарном пограничном слое рассчитывались по схемам Revised MM5 и Yonsei University соответственно. Расчеты выполнялись от срока 0 ч ВСВ 9 марта 2021 г. на 24 ч вперед. Выходные данные модели фиксировались с интервалом 10 мин для построения вертикальных профилей модельных полей потенциальной температуры и ветра и карт-слайдов линий тока.

Данные численного моделирования высокого пространственного разрешения используются для верификации расчетов модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км, предназначенной для выпуска прогноза погоды по территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России в региональном специализированном метеорологическом центре (PCMЦ) Хабаровск. Это необходимо для оценки степени достоверности расчета параметров ГВ [5], полученных на сетке с шагом 5 км.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка степени успешности модельных прогнозов. В [5] представлено описание методологии определения наличия ГВ по данным численной модели прогноза погоды WRF–ARW на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока, в том числе предложены подходы к оценке параметров прогнозируемых горных волн. Показано, что по полю высот узлов модельной сетки (орографии) модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км можно достаточно точно определить ареалы возможного возникновения ГВ, а по модельным значениям параметров текущего состояния атмосферы (вертикальным профилям температуры, влажности, скорости и направления ветра) – оценить наличие ГВ в конкретной географической локализации. Оценка степени адекватности определения местоположения ГВ в прогнозируемые сроки выполнялась путем сравнения модельных расчетов с данными наблюдений из космоса за чечевицеобразной облачностью, порождаемой ГВ.

Существенно сложнее оценить степень соответствия значений параметров ГВ, рассчитанных по модельным данным, их фактическим значениям при отсутствии инструментальных измерений. В [3] приводится ряд формул теории горных волн, по которым предлагается приблизительно оценивать параметры ГВ: высоту вертикального развития, длину волны и скорость вертикального движения. Эти формулы были адаптированы к расчетным данным модели WRF–ARW для определения характеристик волнового процесса в заданных точках сетки прогноза [5].

На снимках с чечевицеобразной облачностью можно визуально определить местоположение ГВ, направление горизонтального распространения волновых возмущений, примерно оценить горизонтальное распространение от источника генерации и приблизительно определить длину волны. Высоту возможного вертикального развития, полученную по модельным данным, можно проверить с по-

мощью данных радиозондирования, если пункт радиозондирования расположен достаточно близко к месту наблюдаемой ГВ. Наиболее сложной является задача оценки степени достоверности прогнозируемой интенсивности ГВ (максимальной скорости вертикальных движений за счет волнового возмущения).

На космических снимках достаточно часто встречаются случаи с хорошо просматриваемой облачностью чечевицеобразной формы от ГВ, генерируемых хребтами и отдельными вершинами малых островов дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана. Эти снимки использовались для оценки степени достоверности модельных прогнозов параметров ГВ. Они позволяют достаточно точно определить орографический источник генерации ГВ, так как влажный морской воздух способствует формированию чечевицеобразной облачности на гребне ГВ при подъеме воздушной массы в устойчиво стратифицированной атмосфере. Кроме того, в связи с распространением волн над морской поверхностью, т.е. при отсутствии препятствий для их горизонтального распространения, имеется возможность оценить дальность распространения.

Здесь следует отметить, что прогноз ГВ на обширной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока в оперативные сроки на имеющихся в РСМЦ Хабаровск вычислительных ресурсах возможен при горизонтальном шаге модельной сетки не менее 5 км. Но для оценки успешности прогноза ареалов возникновения и времени существования ГВ по модели с горизонтальным шагом 5 км вышеупомянутые снимки облачности мало пригодны из-за слишком малых горизонтальных размеров объектов, порождающих ГВ, в сравнении с горизонтальным шагом модели. По таким снимкам можно определить даты, время и местоположение ГВ для численных экспериментов по модели с шагом 1 км по ограниченной территории и далее сравнить расчетные значения параметров ГВ, полученные по модели с шагом 1 км, с параметрами ГВ, полученными на сетке с шагом 5 км. Такой подход опирается на авторский опыт численного моделирования реальных случаев процесса возникновения, развития и затухания ГВ, наблюдавшихся 13 июня и 14 августа 2014 г. на юге о-ва Сахалин при обтекании воздушным потоком Су-сунайского хребта [4]. Численные эксперименты по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 1 км показали, что модель вполне адекватно воспроизводит процессы формирования, развития и затухания горных волн. Получено также, что при увеличении горизонтального шага от 1 до 3 км общая структура волн в целом сохраняется, а интенсивность вертикальных движений снижается.

В этой связи для оценки степени достоверности расчета параметров ГВ выполнялось сравнение расчетов по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 5 км с результатами моделирования отдельных ярко выраженных случаев ГВ на сетке с горизонтальным шагом 1 км. Для этого по спутниковым снимкам подбирались случаи облачности, порождаемой горной волной в местах, близко расположенных к пунктам радиозондирования. Данные радиозондирования позволяют оценить степень близости модельных значений параметров состояния атмосферы (вертикальное распределение температуры, влажности и ветра) в окрестности пункта радиозондирования к данным наблюдений. Числовые характеристики параметров ГВ, рассчитанных по модели с шагом 1 км, можно оценить по косвенным характеристикам, определенным по данным радиозондирования. Ниже в статье приведен пример такого расчета и сравнения для ГВ, порожденной при обтекании воздушным потоком влк. Алайд (о-в Атласова).

Анализ спутникового снимка чечевицеобразной облачности в северной части Курильских островов 9 марта 2021 г. На рис. 1 представлен фрагмент снимка, сделанного около 3 ч Всемирного скоординированного времени (ВСВ) 9 марта 2021 г. КА “Aqua”. Облачность чечевицеобразной формы на снимке указывает



Рис. 1. Фрагмент снимка КА “Аква” (США) около 3 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Черной точкой обозначен Северо-Курильск

на наличие горной волны, распространившейся более чем на 100 км в юго-восточном направлении. Поскольку о-в Шумшу (ближайший к южной оконечности Камчатки остров Курильской гряды) имеет максимальную высоту 198 м, то он не может быть источником ГВ. Обтекание воздушным потоком хребта Вернадского (о-в Парамушир), судя по его расположению и направлению, породило бы шлейф облаков иного местоположения и направленности. Следовательно, зафиксированная на спутниковом снимке облачность чечевицеобразной формы порождена ГВ, возникшей при обтекании влк. Алаид (о-в Атласова) набегающим с северо-запада воздушным потоком.

По данным Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, высота влк. Алаид составляет 2339 м¹. Он является высочайшей точкой Курильских островов и находится в 45 км к северо-западу от Северо-Курильска (о-в Парамушир), где имеется пункт радиозондирования. Радиус о-ва Атласова, образованного вулканом, около 14 км.

Фактическая ситуация и явление. По данным радиозондирования в Северо-Курильске от 00 ч ВСВ 9 марта 2021 г. (табл. 1) наблюдалась высокая устойчивость стратификации атмосферы (значение индекса LI составило 13°).

Северный ветер со скоростью 6 м/с у земли с высотой менял свое направление на северо-западное и усиливался до 16 м/с на высоте 2811 м. Таким образом,

Таблица 1

Фрагмент данных радиозондирования в Северо-Курильске от 00 ч ВСВ 9 марта 2021 г.

Высота, м	Давление, гПа	Температура, °С	Дефицит точки росы, °	Направление ветра, °	Скорость ветра, м/с
134	1000	–6,5	8	0	6
735	925	–12,5	6	320	9
1374	850	–18,3	2,5	300	10
2811	700	–23,7	16	305	16
5190	500	–38,9	12	315	24
6680	400	–50,5	12	305	27
8520	300	–58,1	12	295	25

метеорологические условия в районе о-ва Атласова соответствовали условиям

формирования ГВ [2], распространяющейся в юго-восточном направлении. Распределение температуры и дефицита точки росы по высотам показывает, что при орографическом переваливании влажной воздушной массой конуса вулкана быстро достигается уровень конденсации, и в восходящем потоке образуется облачность. В нисходящем потоке дефицит точки росы растет и облачность рассеивается.

На снимках КА “Himawari-8” (Япония) (рис. 2) облачность при ГВ от влк. Алаид возникла около 2 ч ВСВ 9 марта 2021 г. и просуществовала примерно до 6 ч 30 мин ВСВ. К 5 ч ВСВ в облачности заметно 14 выраженных гребней с расстоянием между ними порядка 7 км.

Моделирование процесса образования горных волн высокого разрешения.

Численные эксперименты высокого пространственно-временного разрешения выполнялись по негидростатической модели WRF–ARW [6] в конфигурации с двумя вложенными сетками, центры которых расположены в точке с координатами 50,9° с.ш., 155,6° в.д. (о-в Атласова, влк. Алаид). Горизонтальный шаг по внешней сетке установлен в 3 км (666×666 узлов), по вложенной сетке – 1 км (664×664 узлов). Подробное описание модели для численных экспериментов приведено выше в разделе «Материалы и методы исследования».

На рис. 3, а представлено поле приземного ветра в форме линий тока в 3 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Направление приземного ветра со скоростями 10–15 м/с практически перпендикулярно о-ву Атласова, что при устойчивой стратификации атмос-



Рис. 2. Облачный покров по данным КА “Himawari-8” (Япония) 9 марта 2021 г.

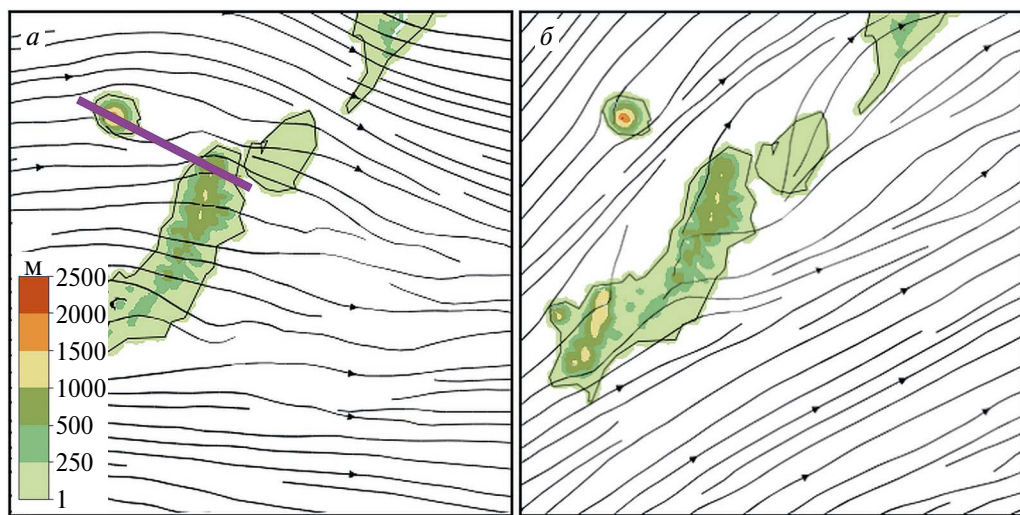


Рис. 3. Модельное поле линий тока на сетке с шагом 1 км: а – в 3 ч ВСВ, б – в 10 ч ВСВ 9 марта 2021 г. Жирной прямой линией указано направление разреза через вершину влк. Алаид (высота в модели 2066 м), по которому построены вертикальные профили полей потенциальной температуры и ветра, представленные ниже

феры (модельное значение индекса LI составляет 14°C) приводит к образованию горной волны. Воздушный поток при обтекании вулкана вынужден измениться (что отражается в искривлении линий тока) из-за необходимости подъема части набегающего воздуха с наветренной стороны препятствия и последующего опускания с подветренной стороны. Далее эти вертикальные колебания частиц воздуха распространяются в горизонтальной плоскости по направлению ветра.

Первые волновые движения воздуха образуются к концу первого часа моделирования (рис. 4, а), амплитуда колебаний сопоставима с высотой горного препятствия (2066 м по модельной топографии), что является одним из признаков ГВ. К 3 ч ВСВ (рис. 4, б) вертикальное развитие ГВ достигает 7000 м, с подветренной стороны препятствия формируется несколько гребней волны, скорость вертикальных движений находится в пределах от 3 до 5 м/с. Явление приобретает наибольшее развитие между 4 и 6 ч ВСВ, так, на рис. 4, в (в 5 ч 50 мин ВСВ) насчитывается 9 гребней волны. В этот период модуль максимальных скоростей восходящих и нисходящих движений воздуха достигает 10 м/с. Затем волновой процесс затухает и практически полностью завершается к 10 ч ВСВ при повороте приземного ветра к юго-западу (рис. 3, б).

В соответствии с теорией горных волн [3] образование ГВ оказывает существенное влияние на температуру воздуха: подъем воздушной массы (ВМ) при устойчивой стратификации приводит к падению температуры, а при опускании ВМ ее температура возрастает. На рис. 4 это хорошо иллюстрируется пилообразными колебаниями изолиний потенциальной температуры.

Хотя в теории горных волн получены значительные результаты [2, 3], но для части задач, особенно в трехмерной постановке [13], возможно получить лишь приближенное численное решение. Вулкан Алаид имеет правильную коническую форму, поэтому при образовании ГВ можно выявить некоторые дополнительные черты волнового процесса. Во-первых, всей набегающей на препятствие воздушной массе нет необходимости переваливать через остров, большая ее часть обтекает вулкан (исходя из структуры линий тока, см. рис. 3, а), при дальнейшем распространении ГВ это приводит к уменьшению амплитуды и к более быстрому затуханию волнового процесса. Во-вторых, на рисунках 4, б, в, где представлен разрез в плоскости трехмерного явления, расстояние между гребнями волн изменяется. Это можно объяснить тем, что части разделившегося воздушного потока взаимодействуют с подветренной стороны, т.е. могут как усилить, так и погасить друг друга с учетом деформаций, вызываемых северной оконечностью о-ва Парамушир.

При построении вертикальных профилей потенциальной температуры и ветра по другим разрезам (также проходящим через вершину Алаида, но под другими углами) было выявлено формирование узловой поверхности [3], т.е. тонкого слоя атмосферы, в котором значения возмущений скорости практически равны нулю, а линии тока выше и ниже этого слоя зеркально симметричны. Это происходит потому, что волна распространяется не строго перпендикулярно к поверхности земли, а под наклоном. При максимальном развитии модельного явления узловая поверхность находилась на высоте около 7 км, а вертикальные движения прослеживались до 14 км.

После поворота приземного ветра к северо-востоку модельная ГВ существенно ослабевает, но возле вулкана продолжают сохраняться вертикальные восходящие и нисходящие движения воздуха.

Расчет параметров горных волн по оперативной версии модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км. Расчеты современной гидродинамической модели прогноза погоды на сетке с горизонтальным шагом 1 км для всей территории Восточной Сибири и Дальнего Востока с готовностью продукции в оперативные сроки в настоящее время невозможны. Текущая конфигурация вычислительных

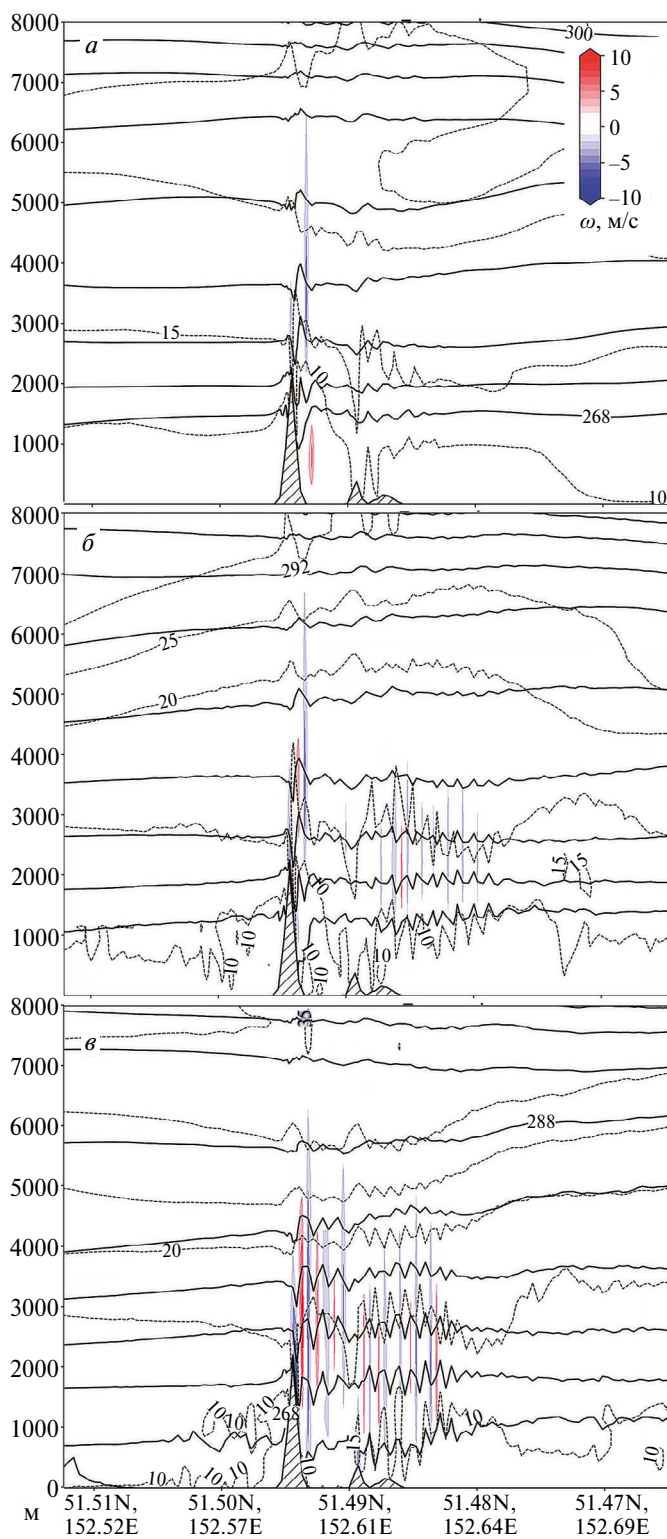


Рис. 4. Вертикальные профили модельной потенциальной температуры (К), скорости ветра (м/с) и вертикальной скорости (ω , м/с) в слое до высоты 8000 м: *a* – в 0 ч 50 мин ВСВ, *б* – в 3 ч ВСВ, *в* – 5 ч 50 мин ВСВ. Сплошной линией указана потенциальная температура, пунктирной – скорость ветра. Штриховкой обозначен рельеф местности

средств РСМЦ Хабаровск позволяет в оперативные сроки выпускать численный прогноз на сетке с горизонтальным шагом не менее 5 км.

Максимальная высота узла модельной сетки с шагом 5 км (из совокупности всех узлов, попавших на территорию о-ва Атласова) составляет всего 683 м – это и есть высота влк. Алаид в оперативной версии модели. Конечно, если бы центр сетки модели с шагом 5 км был установлен в те же координаты, что и в версии модели с шагом 1 км, то высота вулкана в сетке 5 км была бы такой же, как и в модели с шагом 1 км. Но центральная точка области прогноза в оперативной версии модели выбирается из условий полного охвата необходимой территории с учетом расширения границы области расчета, так чтобы самые крайние районы прогноза располагались на достаточном расстоянии от границы.

По версии модели с шагом 5 км при расчете от срока 0 ч ВСВ 9 марта 2021 г. формируется достаточно слабый волновой процесс во второй половине дня. Высота вертикального развития волн составила около 10 000 м, длина волны около 5 км, максимальная вертикальная модельная скорость достигает 3–5 м/с. Основной причиной несовпадения времени начала процесса формирования ГВ является слишком малая модельная высота вершины вулкана и недостаточно малый шаг сетки, так как с ним сопоставима длина волны.

Несмотря на то что для генерации горной волны отдельно стоящей вершины нет ограничений по направлению набегающего воздушного потока, из-за малой высоты модельного узла, соответствующего вершине влк. Алаид, заметное возмущение воздушного потока на сетке с шагом 5 км воспроизводится слабо. Для сравнения расчетов по модели WRF–ARW с горизонтальными шагами сетки 1 км и 5 км в табл. 2 приводятся значения параметров, определяющих условия возникновения и существования ГВ, и расчетные волновые характеристики в фиксированные моменты времени, соответствующие периоду развития и затухания явления, определенному по модельным данным с шагом 1 км и снимкам облачности КА “Himawari-8” (Япония).

Как видно из данных табл. 2, индекс LI по обеим версиям модели показывает очень устойчивое состояние атмосферы во все рассматриваемые сроки. Хотя по модели в 1 км значения индекса LI несколько выше (13–14°), чем по модели 5 км (11–12°), тем не менее все они близки к значениям, рассчитанным по данным радиозондирования. С учетом разницы во времени и расстояния до пункта радиозондирования от вершины влк. Алаид можно считать, что модельные значения индекса LI и тенденции его изменения соответствуют факту.

Горизонтальная скорость приземного ветра в 3 ч ВСВ по обеим версиям модели примерно одинаковая (21 и 20 м/с) и на 6 и 5 м/с выше (для сеток с шагом 1 и 5 км соответственно), чем на уровне 700 гПа по радиозонду (где высота уровня 700 гПа близка к вершине вулкана, см. табл. 1). Более высокую скорость по модели в сравнении с данными радиозондирования легко объяснить: пункт радиозондирования находится на относительно большом острове и прикрыт от северного и северо-западного ветра небольшим хребтом, а вулкан расположен практически в открытом море.

По состоянию на 6 ч ВСВ в модели с шагом 1 км ветер в окрестности вершины вулкана усилился до 30 м/с (время максимального развития ГВ), а в модели 5 км этого не случилось, и ГВ в этот срок не сформировалась (расчетная вертикальная скорость составила 2 м/с).

К 9 ч ВСВ по обоим вариантам расчета получено снижение скорости приземного ветра в окрестности вулкана до 14 м/с (на сетке с шагом 1 км) и 10 м/с (на сетке с шагом 5 км). Снижение скорости показывает и радиозонд: на уровне 700 гПа – с 15 до 12 м/с, на высоте 1000 гПа – с 6 до 3 м/с.

Расчетные характеристики горной волны 9 марта 2021 г. вблизи о-ва Атласова

Шаг сетки, км	BCB	Метеорологические параметры			Расчетные характеристики ГВ [3, 5]		
		LI, °	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, румб	Длина волны, м	Высота распространения, м	Максимальная вертикальная скорость, м/с
1 км	3 ч	14	21	СЗ	813	6878	15
	6 ч	14	30	СЗ	739	8641	13
	9 ч	13	14	ЮЗ	2311	4782	3
5 км	3 ч	12	20	СЗ	5298	7257	4
	6 ч	11	13	СЗ	8792	9267	2
	9 ч	11	10	ЮЗ	3458	4224	1
Значения по данным радиозондирования в Северо-Курильске							
Уровень, гПа	BCB	LI, °	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, румб	Длина волны, м	Высота распространения, м	Максимальная вертикальная скорость, м/с
1000	0 ч	13	6	С	703	5190	13
850			10	СЗ			
700			15	СЗ			
500			22	СЗ			

Длина волны, рассчитанная по данным модели с шагом 1 км, составляла 813 м в 3 ч, 739 м – в 6 ч, а к 9 ч BCB она увеличилась до 2311 м, что отражает затухание процесса. Оценка высоты вертикального развития по значениям вертикальной скорости составила до 7 км на 3 ч, более 8 км – на 6 ч и снизилась до высоты менее 5 км к 9 ч BCB. При этом максимальные скорости вертикальных движений (восходящих и нисходящих) оценены в 15, 13 и 3 м/с соответственно. Эти же характеристики, определенные по данным модели 5 км, показывают существенно большую длину волны (5300, 8800 и 3500 м) при весьма малых скоростях вертикальных движений (4, 2 и 1 м/с), т.е. полученный модельный волновой процесс значительно слабее (по сути, ГВ отсутствует), чем по модели с шагом 1 км. Около 9 ч BCB приземный ветер по обоим вариантам расчета меняет направление на юго-западное, что соответствует данным наблюдений.

Если использовать для расчета параметров ГВ данные радиозондирования от срока 00 ч BCB 9 марта 2021 г., условно полагая, что они близки к значениям параметров состояния атмосферы на о-ве Атласова в 3 ч BCB, то длина волны составит 703 м, высота вертикального развития – до 5190 м и максимальная скорость вертикальных движений – 13 м/с. Эти результаты близки к модельным данным, полученным на сетке с горизонтальным шагом 1 км в 3 и 6 ч BCB.

Заключение

В статье представлен способ оценки степени соответствия значений параметров ГВ, рассчитанных по методологии [5], предполагаемым реальным

значениям этих параметров, оцененным по спутниковым снимкам и данным радиозондирования. Такой подход используется в связи с отсутствием инструментальных измерений требуемых параметров (местоположения ГВ, интенсивности, вертикального и горизонтального развития).

Сравнение результатов численных экспериментов по модели WRF–ARW с горизонтальным шагом 1 км (выполненных по ограниченному району) показывает хорошее совпадение со спутниковыми снимками чечевицеобразной облачности и данными радиозондирования. К сожалению, такие расчеты невозможно выполнять в оперативной практике по всей территории Дальневосточного региона России, так как они слишком объемны для современных вычислительных систем (не только в РСМЦ Хабаровск, но и по текущему состоянию развития вычислительной техники в мире в целом). Их можно выполнить только по ограниченной территории в окрестности заданной точки (конкретного аэродрома или орографического объекта).

Тем не менее, как показано в [5], для крупных горных хребтов местоположение ГВ по модели с шагом 5 км определяется вполне адекватно спутниковым снимкам чечевицеобразной облачности, и при небольших различиях модельных и реальных высот рельефа значения параметров ГВ, рассчитанных по модельным данным, могут быть достаточно близки к фактическим. Кроме того, значения параметров ГВ по данным модели с шагом 5 км могут быть откалиброваны данными, рассчитанными по модели с шагом 1 км, при достаточно большом количестве численных экспериментов, выполненных постфактум.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sharman R.D., Lane T. (Eds.). *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
2. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.
3. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. *Турбулентность в свободной атмосфере*. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 288 с.
4. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Сильные шквалистые ветры в Южно-Сахалинске летом 2014 г. // *Геосферные исследования*. 2023. № 4. С. 141–154. EDN: LZBUBM.
5. Вербицкая Е.М., Крохин В.В., Романский С.О. Прогноз опасных для авиации явлений погоды на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока России // *Труды ДВНИГМИ*. 2024. Вып. 157. С. 18–40.
6. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1956. Vol. 37. P. 528–529. DOI: 10.1175/1520-0477-37.10.528.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split non-hydrostatic atmospheric model for research and NWP applications // *Journal of Computational Physics*. 2007. Vol. 227 (7). P. 3465–3485. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
8. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary gravity wave dynamics in local and global models. 1: Mountain waves in the stratosphere and mesosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127. e2021JD035990. DOI: 10.1029/2021JD035990.
9. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary wave dynamics in local and global models. 2: Mountain wave and secondary wave evolutions in the thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022. Vol. 127. e2021JD036035. DOI: 10.1029/2021JD036035.
10. Feltz W.F., Bedka K.M., Otkin J.A., Greenwald T., Ackerman S.A. Understanding satellite-observed mountain-wave signatures using high-resolution numerical model data // *Weather and Forecasting*. 2009. Vol. 24. P. 76–86. DOI: 10.1175/2008WAF2222127.1.

11. Wilms H., Bramberger M., Dörnbrack A. Observation and simulation of mountain wave turbulence above Iceland: turbulence intensification due to wave interference // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. P. 3326–3346. DOI: 10.1002/qj.3848.
12. Xia G., Draxl C., Raghavendra A., Lundquist J.K. Validating simulated mountain wave impacts on hub-height wind speed using SoDAR observations // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. P. 2220–2230. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.127.
13. Eckermann S.D., Lindeman J., Broutman D., Ma J., Boybeyi Z. Momentum fluxes of gravity waves generated by variable Froude number flow over three-dimensional obstacles // *Journal of Atmospheric Sciences*. 2010. Vol. 67. P. 2260–2278. DOI: 10.1175/2010jas3375.1.

REFERENCES

1. Sharman R.D., Lane T. (Eds.). *Aviation turbulence: processes, detection, prediction*. Springer International Publishing; 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-23630-8.
2. Barry R.G. *Mountain weather and climate*. Cambridge: Cambridge University Press; 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754753.
3. Vinnichenko N.K., Pinus N.Z., Shmeter S.M., Shur G.N. *Turbulentnost' v svobodnoj atmosfere* = [Turbulence in free atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1976. (In Russ.).
4. Romanskij S.O., Verbickaja E.M. Sil'nye shkvalistye vetry v Juzhno-Sahalinske letom 2014 g. = [Strong gusty wind in Yuzno-Sakalinsk in summer of 2014]. *Geosfernye Issledovanija*. 2023;4:141–154. EDN: LZBUBM. (In Russ.).
5. Verbickaja E.M., Krohin V.V., Romanskij S.O. Prognoz opasnyh dlja aviatsii javlenij pogody na territorii Vostochnoj Sibiri i Dal'nego Vostoka Rossii = [Forecasting of severe weather events for aviation on the territory of Eastern Siberia and Russian Far East]. *Trudy DVNIGMI*. 2024;157:18–40. (In Russ.).
6. Galway J.G. The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1956;37:528–529. DOI: 10.1175/1520-0477-37.10.528.
7. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split non-hydrostatic atmospheric model for research and NWP applications. *Journal of Computational Physics*. 2007;227(7):3465–3485. DOI: 10.1016/j.jcp.2007.01.037.
8. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary gravity wave dynamics in local and global models. 1: Mountain waves in the stratosphere and mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022;127. e2021JD035990. DOI: 10.1029/2021JD035990.
9. Fritts D.C., Lund A.C., Lund T.S., Yudin V. Impacts of limited model resolution on the representation of mountain wave and secondary wave dynamics in local and global models. 2: Mountain wave and secondary wave evolutions in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022;127. e2021JD036035. DOI: 10.1029/2021JD036035.
10. Feltz W.F., Bedka K.M., Otkin J.A., Greenwald T., Ackerman S.A. Understanding satellite-observed mountain-wave signatures using high-resolution numerical model data. *Weather and Forecasting*. 2009;24:76–86. DOI: 10.1175/2008WAF2222127.1.
11. Wilms H., Bramberger M., Dörnbrack A. Observation and simulation of mountain wave turbulence above Iceland: turbulence intensification due to wave interference. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020;146:3326–3346. DOI: 10.1002/qj.3848.
12. Xia G., Draxl C., Raghavendra A., Lundquist J.K. Validating simulated mountain wave impacts on hub-height wind speed using SoDAR observations. *Renewable Energy*. 2021;163:2220–2230. DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.127.
13. Eckermann S.D., Lindeman J., Broutman D., Ma J., Boybeyi Z. Momentum fluxes of gravity waves generated by variable Froude number flow over three-dimensional obstacles. *Journal of Atmospheric Sciences*. 2010;67:2260–2278. DOI: 10.1175/2010jas3375.1.