

ПРОГНОЗ ГОРНЫХ ВОЛН

на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока

по данным численных моделей прогноза погоды высокого пространственного разрешения

Е.М. Вербицкая, С.О. Романский

*Дальневосточный региональный гидрометеорологический
Институт Росгидромета (ФГБУ «ДВНИГМИ»)*

Доклад на V всероссийской конференции
«ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИНАМИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТА»
Москва, 19-21 ноября 2024 г.

Объект исследования

Горная волна (ГВ) – это частный вид гравитационных атмосферных волн, которые образуются при обтекании орографических препятствий воздушным потоком, при устойчивой термической стратификации атмосферы.

Вертикальные скорости (ω) в ГВ могут достигать 20 - 25 м/с.

Амплитуды ГВ сравнимы с высотой препятствия и часто превышают эту высоту.

Наличие и интенсивность ГВ **зависит** от скорости ветра, термической стратификации атмосферы, высоты и формы препятствия, ориентации препятствия относительно воздушного потока и др.

**Горные волны являются опасными для авиации
атмосферными явлениями.**

Актуальность задачи

Простого взгляда на физическую карту Восточной Сибири и Дальнего Востока достаточно, что бы понимать, что на этой территории **ГВ** в том или ином месте может возникать практически ежедневно.

Поэтому *прогнозирование наличия и интенсивности ГВ* весьма актуальная задача для рассматриваемой территории РФ,

особенно с учетом того, что авиация
(в том числе, малая) здесь является
основным видом транспорта
в условиях слабо развитой системы
железных и автомобильных дорог.

Решение этой задачи выполняется в рамках темы 1.4.2.2 Плана НИРТ Росгидромета на 2020 – 2024 гг.

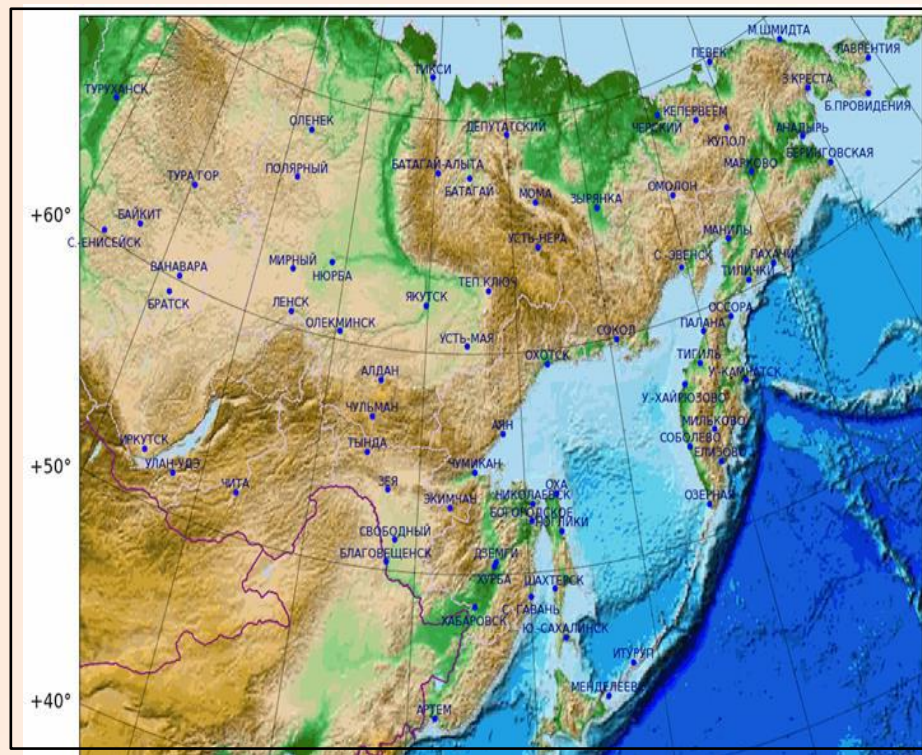


Рис. 1. Физико-географическая карта ДВ-региона

Сложности решения задачи

Основной сложностью задачи прогнозирования **ГВ** является практически полное отсутствие наблюдений за рассматриваемым явлением.

ГВ невозможно увидеть визуально, за исключением случаев, когда она порождает специфическую облачность чечевицеобразной формы.

Параметры **ГВ** (длину волны, скорость вертикальных потоков, высоту и ареалы горизонтального распространения) очень трудно измерить инструментально.

Это является основной причиной отсутствия методов прогнозирования этого, опасного для авиации, атмосферного явления.

Диагноз наличия и оценка интенсивности ГВ стали возможны благодаря развитию *негидростатических мезомасштабных моделей* атмосферы высокого пространственного разрешения с достаточным физическим наполнением и подробным описанием орографии.

Возможность численного прогнозирования ГВ в ДВ-регионе РФ

Численные эксперименты по модели *WRF-ARW* с горизонтальным шагом **3 км** и **1 км**, выполненные авторами *постфактум* по небольшой территории, когда известно место и время исследуемого явления, показали, что эта модель вполне адекватно воспроизводит процессы возникновения, развития и затухания **ГВ** [1].

Задача прогнозирования ГВ (в отличие от задачи *моделирования*) подразумевает *определение места и времени* возможного возникновения **ГВ** на обширной *территории ДВ-региона* с большим количеством горных массивов и орографических неровностей различных форм и географической ориентации.

При этом, расчеты по модели необходимо выполнять с достаточно большим горизонтальным шагом для получения прогноза в оперативные сроки.

Задачи прогнозирования ГВ на большой территории

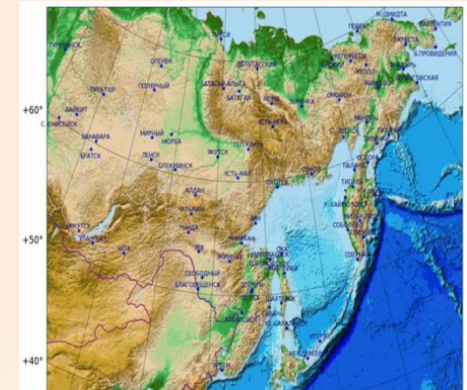
Известно, что **ГВ возникают** в процессе обтекания орографических препятствий при одновременном выполнении следующих условий:

- **устойчивая** термическая **стратификация**;
- **скорость** набегающего **ветра** не менее **7 м/с**;
- **направление ветра** практически перпендикулярно к препятствию.

Выполнение первых 2-х условий легко определить по данным модели:

- **составляющие скорости ветра** (**u, v, w**) рассчитываются непосредственно в модели и известны в каждом узле сетки на каждый момент времени соответственно шагу интегрирования модели;
- **степень устойчивости термической стратификации** в каждом горизонтальном узле модельной сетки в текущий момент времени определяется по индексу **LI**, представляющему собой разность между температурой окружающего воздуха на некоторой высоте и температурой частицы воздуха адиабатически поднятой на эту высоту.

Поэтому **одной из основных задач прогнозирования ГВ** по большой территории **является определение типа местности и форм рельефа**, способных к формированию **ГВ**, а так же определение **интервалов направления ветра**, при которых возможно возникновение **ГВ** для каждой формы рельефа.



Тип местности – горная или равнинная

Точного определения *горной местности* с точки зрения возникновения **ГВ** не существует.

Такие определения есть в национальных авиационных правилах (РФ [2], США, ЕС [3]) и рекомендациях ИКАО [4] для определения минимальной высоты полета ВС над территорией с гористым рельефом.

Согласно регламентам РФ "*горная местность*" это местность с абсолютной высотой рельефа ≥ 1000 м или местность с пересеченным рельефом с относительными превышениями высот ≥ 500 м в радиусе 25 км.

Т.о. в *горной местности* с абсолютной высотой рельефа < 1000 м разность высот текущего узла *модельной сетки* с узлами, расположенными на расстоянии ≤ 25 км, должна быть не менее 0,02 от горизонтального шага сетки.

Остальные узлы сетки с высотой < 1000 м относятся к *«равнинной местности»*.

Полагается, что в *«равнинной местности»* **ГВ** не возникает.

-
2. Федеральные авиационные правила полетов в воздушном пространстве Российской Федерации. - Приложение к Приказу Министра обороны РФ N 136, Минтранса РФ N 42, Росавиакосмоса N 51 от 31.03.2002 "Об утверждении Федеральных авиационных правил полетов в воздушном пространстве Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте РФ 24.07.2002 N 3615).
 3. Civil Aviation Regulations – Operations Aeroplane 1 Commercial air transportation (Aeroplanes).
Режим доступа: <https://drive.google.com/file/d/1wzX-L26qlconTk8V1as9zr4E6bhXt6td/view>. Дата обращения: 01.09.2021.
 4. Doc 8168, Procedures for Air Navigation Services — Aircraft Operations Volume II, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures.
Montreal: ICAO, 2014. 934 p.

Результат определения горной местности в ДВ-регионе

На слайде представлен результат применения изложенного подхода к делению узлов модельной сетки на горную и не горную местность в **ДВ-регионе** по высотам узлов модели **WRF-ARW** с шагом **5 км**.

Видно, что к *горной местности* отнесены практически все орографические объекты, которые можно отнести к таковой согласно физической карте рассматриваемой территории.

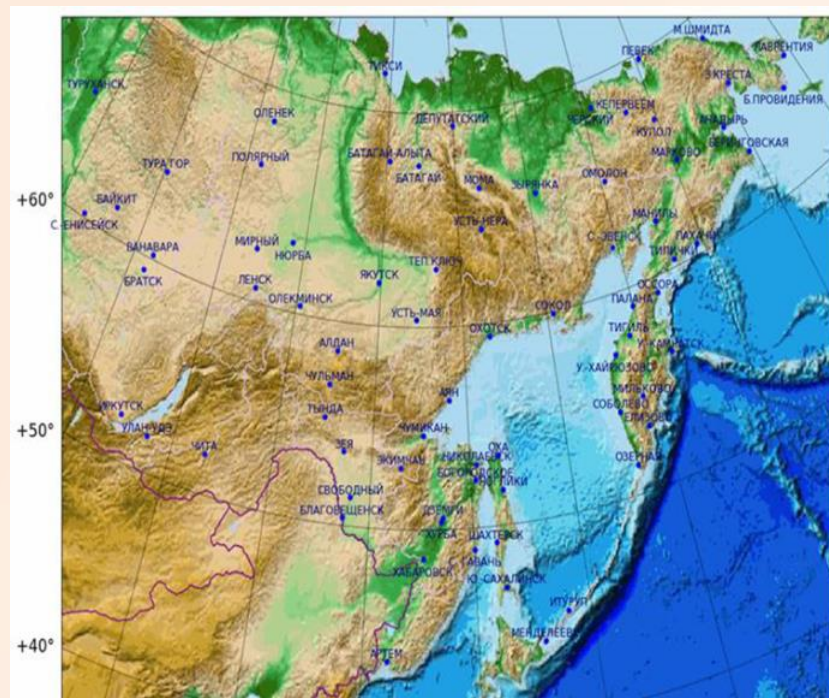
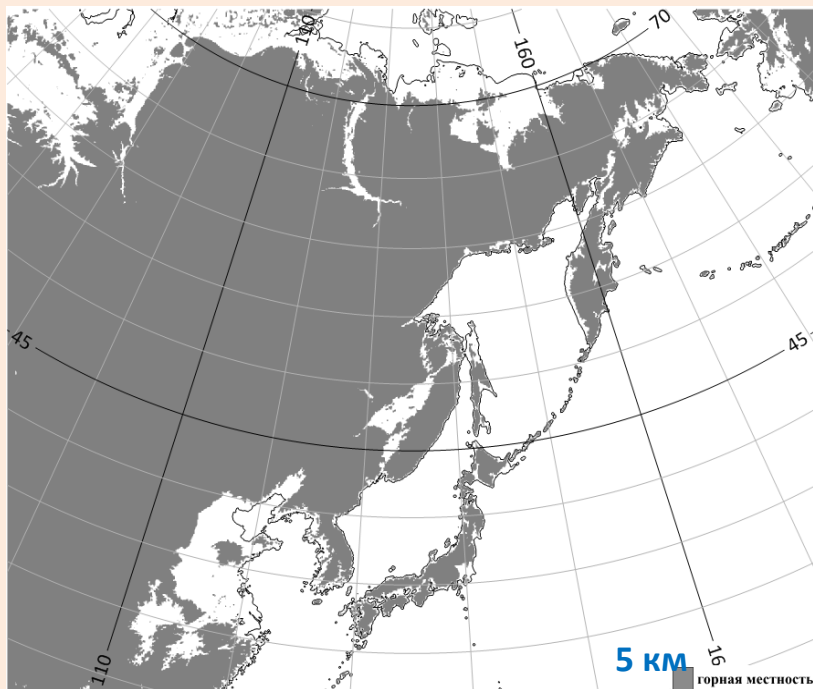


Рис. 2. Определение горной местности по орографии модели WRF-ARW с шагом 5 км

Формы рельефа в горной местности

В узлах модельной сетки, отнесенных к «*горной местности*» необходимо определить *форму рельефа* способную к генерации ГВ.

В методе рассматриваются следующие основные формы рельефа:

холм, впадина, хребет, склон, ложбина, склон с ложбиной, плато.

Полагается, что ГВ может возникать при формах рельефа

холм, хребет, склон, склон с ложбиной.

Формы рельефа «*впадина, ложбина, плато*» ГВ не генерируют.

Алгоритм определения *форм рельефа* основан на анализе соотношений высот текущего узла модельной сетки и узлов окружения .

Программное средство определения горной местности и форм рельефа по модельным данным зарегистрировано в Роспатенте (рег. № 2922613563, 14 марта 2022 г.)

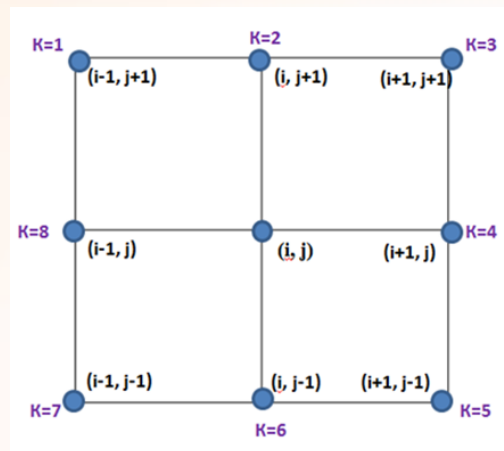


Рис. 3. Схема узлов окружения

Для иллюстрации на слайде представлены

Формы рельефа, определенные на территории Чукотки

на рисунке слева хорошо виден Золотой хребет в районе а/д Угольные Копи г. Анадырь

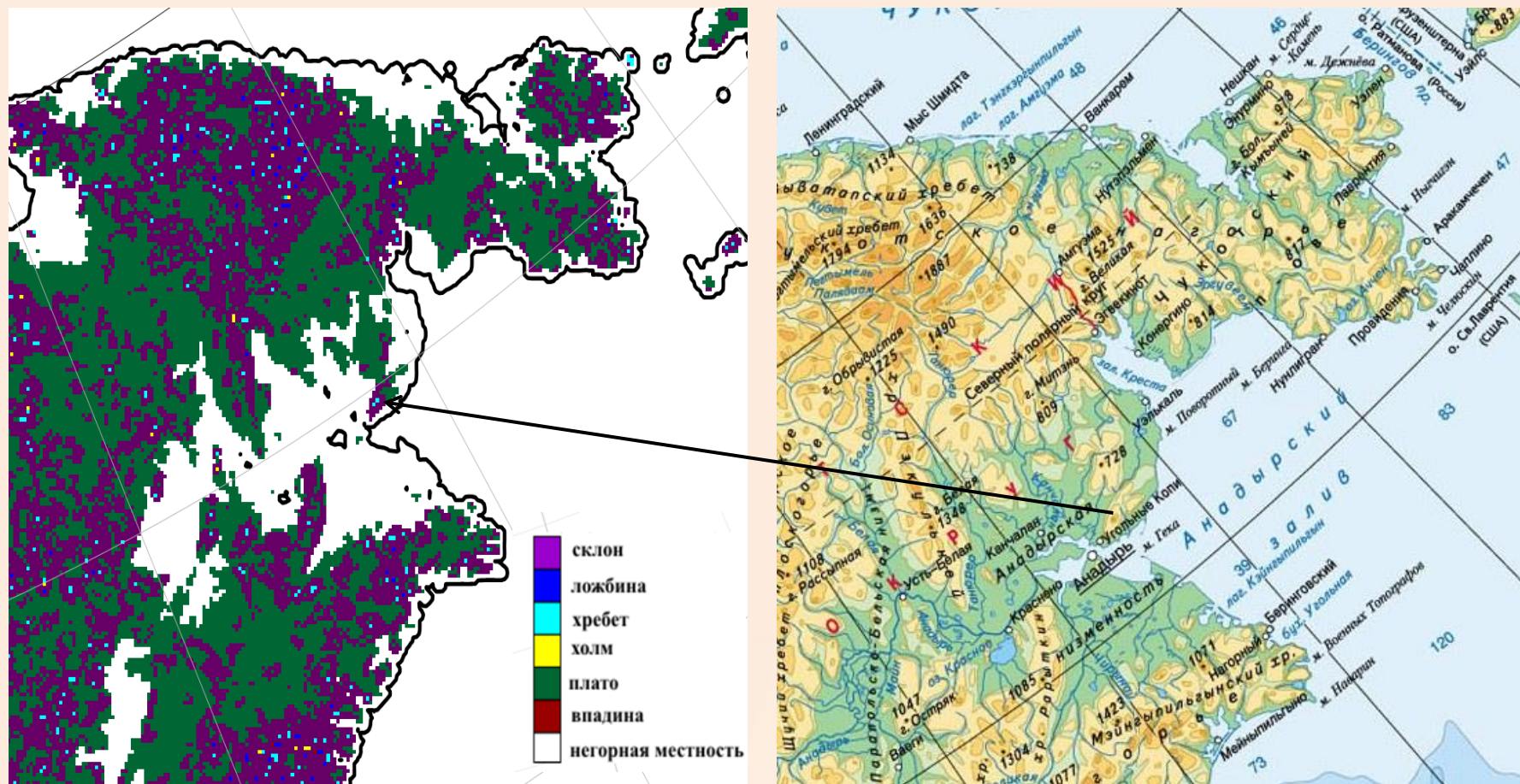


Рис. 4.2. Формы рельефа - модель WRF-ARW (5 км): Чукотка Анадырь (а/д Угольные Копи – Золотой хребет).

Ареалы возможного возникновения ГВ

На рисунке 5 представлены **ареалы потенциального возникновения ГВ** полученные методом определения форм рельефа, способных к генерации ГВ на рассматриваемой территории.

Направление ветра для форм рельефа, способных к генерации ГВ

Для каждого горизонтального узла модельной сетки, отнесенного к **горной местности** с **формой рельефа**, допускающий генерацию ГВ определяется **направление ветра**, при котором может возникнуть ГВ:

1. В узлах типа «**холм**» ГВ возможна при любом направлении приземного ветра.
2. В узлах типа «**хребет**» - при ветре, перпендикулярном к направлению хребта.
3. В узлах типа «**склон**» ветер должен дуть в сторону склона.
4. В узлах сетки типа «**склон с ложбиной**» для генерации ГВ ветер должен дуть вдоль ложбины в сторону склона.

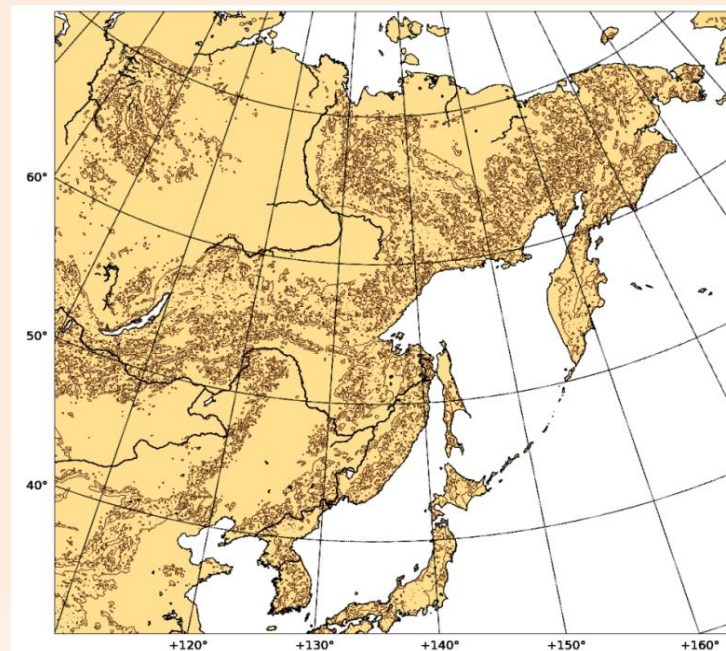


Рис. 5. Ареалы возможного возникновения ГВ на территории Восточной Сибири и дальнего Востока (коричневые точки).

Оценка параметров ГВ

Оценка параметров ГВ опирается на теоретические основы, представленные в трудах Скорера и Дородницына, а так же на анализ данных наблюдений и теоритических положений, приведенных в [5-7].

Длина волны в узлах генерации оценивается по приближенной формуле Скорера:

$$\lambda \approx 2 * \pi * U * \sqrt{\frac{T}{g*(\Gamma-\Upsilon)}} \quad (1)$$

где λ – длина волны, U – среднее значение горизонтальной скорости ветра, перпендикулярной к препятствию, π – число π , Γ – адиабатический вертикальный градиент температуры, Υ – вертикальный градиент температуры, g – ускорение свободного падения.

Вертикальная скорость оценивается по соотношению [11]:

$$w(z) = U * \left(1 - \frac{\Upsilon}{T_0} z\right)^{\frac{\kappa R(\Upsilon_a - \Upsilon) + g}{2\kappa R \Upsilon}} \frac{\sin D(H-z)}{\sin DH} \frac{d\zeta}{dx} \quad (2)$$

где U – средняя скорость ветра, $z = \zeta(x)$ – уравнение поверхности препятствия, D – параметр Дородницына, H – высота тропопаузы (полагается, что $w(H) = 0$), $\kappa = \frac{c_p}{c_v} = 1,41$ (c_p и c_v теплоемкости при постоянном давлении и объеме).

Средняя амплитуда волны полагается равной высоте препятствия.

5. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шмелер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 288 с.

6. Барри Р.Г. Погода и климат в горах. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.

7. Мусаелян Ш.А. Волны препятствий в атмосфере. Л. Гидрометеиздат, 1962, 142 с.

Ареал распространения ГВ

Ареал распространения ГВ из узла генерации в **горизонтальном направлении** определяется в зависимости от длины волны и рельефа местности:

- если в направлении горизонтального распространения **ГВ** нет орографических препятствий, то дальность распространения ограничивается **10** длинами волн.
- если в направлении горизонтального распространения **ГВ** встречается орографическое препятствие, то дальность распространения ограничивается этим препятствием.

При оценке распространения волнового возмущения в **вертикальном направлении** атмосфера рассматривается как слоистая среда.

В рамках модельного процесса атмосферные слои ограничиваются вертикальными уровнями модели:

- если в каком-либо слое максимальная вертикальная скорость волнового движения **$w = 0$** , то полагается, что в данном слое расположена узловая поверхность;
- если в каком-либо слое получена неустойчивая термическая стратификация, то полагается, что условий для дальнейшего распространения **ГВ** по вертикали нет.

Текущая версия оперативных прогнозов

На основе представленного подхода разработана оперативная технология прогноза ареалов возникновения и параметров **ГВ** и на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока по данным модели **WRF-ARW** с горизонтальным шагом **5 км**.

На рисунках приведены примеры прогноза ареалов генерации **ГВ** в прогнозируемых метео-условиях (**зеленым цветом**).

На картах видно изменение прогнозируемого местоположения ареалов возникновения **ГВ** в соответствии с динамикой полей ветра и индекса **LI**.

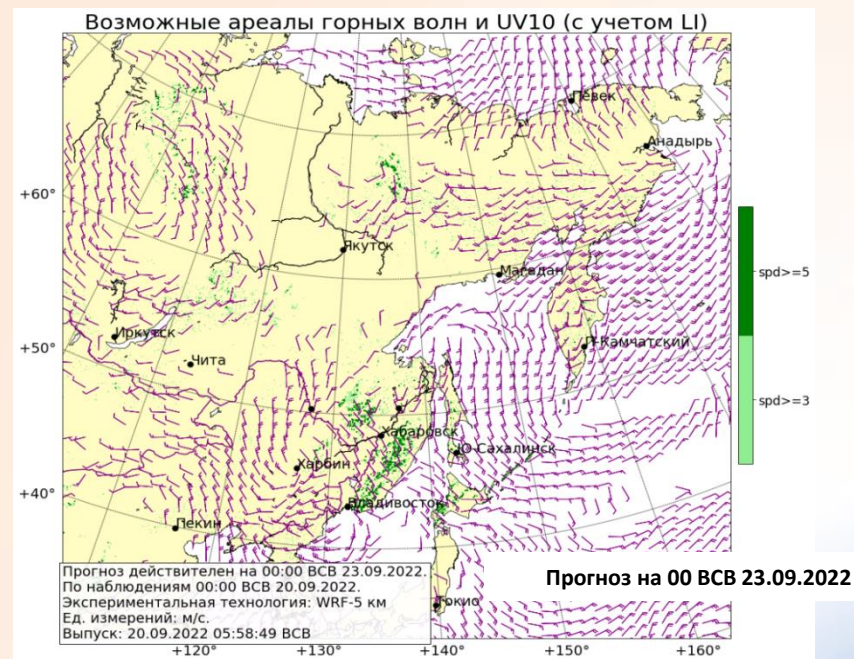
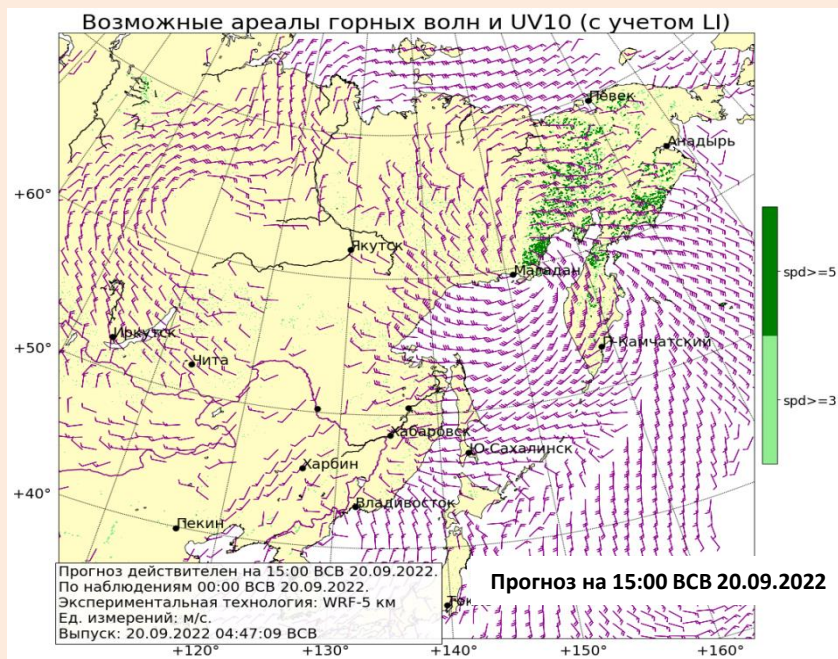


Рис. 8. Прогноз ареалов ГВ, рассчитанный по данным наблюдений от срока 00 ВСВ 20.09.2022

на слайде представлены

Примеры оперативных прогнозов характеристик ГВ



а) ареалы генерации



б) длина волны



в) интенсивность (w)



г) высота распространения

Рисунок 9. Прогнозируемые параметры ГВ, рассчитанные по модели WRF-ARW с горизонтальным шагом 5 км: прогноз на 00 ВСВ 1 декабря 2022 г., рассчитанный от 12 ВСВ 30.11.2022 г.

Результаты и Выводы

На основе представленных положений и подходов к решению задачи прогнозирования **ГВ** *разработана оперативная технология прогноза* на обширной территории Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ по данным модели **WRF-ARW** с горизонтальным шагом **5 км** и **51** уровнем по вертикали.

Сравнение местоположения прогнозируемой ГВ со спутниковыми снимками чечевицеобразной облачности, показало **вполне удовлетворительное совпадение**.

Степень близости расчетных параметров к реальным процессам оценивалась по спутниковым снимкам чечевицеобразной облачности, расчетам по модели с шагом 1 км (по ограниченной территории) и данным радиозондирования.

Сравнение расчетов по оперативной технологии (с шагом **5 км**) и по модели с шагом **1 км** (постфактум) показало занижение значений длины волны и максимальной вертикальной скорости моделью с шагом **5 км**, в сравнении с расчетами с шагом **1 км**. Это происходит преимущественно за счет занижения высоты препятствия по 5-км оротографии, а так же за счет погрешности прогноза скорости и направления ветра.

Тем не менее, *прогнозы* основных ареалов генерации **ГВ**, интенсивности по градациям и вертикального развития *можно оценить как удовлетворительные*, особенно в условиях полного отсутствия прогнозов этого опасного для авиации атмосферного явления на рассматриваемой территории.

Доклад окончен
Спасибо за внимание