

Параметризация пограничного и приземного
слоев атмосферы при моделировании
устойчивых ситуаций в Арктике, для моделей
прогноза погоды COSMO-Ru и ICON-Ru

Перов В.Л., Никитин М.А., Татаринович Е.В.

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
РФ, Москва*

V Всероссийская конференция с международным участием

Турбулентность, динамика атмосферы и климата

Посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова

19–21 ноября 2024 г. Москва

- Описание турбулентности в современных моделях прогноза погоды является важной и не до конца решенной задачей. Основные трудности при решении этой задачи связаны с сильной нелинейностью уравнений.
- Различные неустойчивости в атмосфере приводят к появлению вихрей и волн, которые развиваются на разных пространственных и временных масштабах. Нелинейные взаимодействия между движениями на разных масштабах генерируют в атмосфере нерегулярные течения.
- Решения для таких течений существуют только в простейших случаях, которые локально изотропны и которые зависят только от одного безразмерного параметра – числа Рейнольдса (Re).
- Модели турбулентности, применяемые для моделирования таких сложных течений, должны быть способны учитывать различные влияния на разных масштабах.

- Однако, осреднения Рейнольдса уравнений Навье-Стокса, используемые в моделях прогноза погоды, не делают различия между масштабами, смешивая их вместе.
- В отличие от этого подхода, спектральный алгоритм, применяемый в нашей работе учитывает зависимость атмосферных процессов от масштабов.
- В докладе рассматривается применение спектрального алгоритма для турбулентных течений в пограничном слое атмосферы (ПСА), основное внимание обращается на трудных для моделирования ситуациях с устойчивой и сильно устойчивой температурной стратификацией.
- Устойчивая стратификация ПСА приводит к возникновению пространственной анизотропии турбулентности, т.е. уменьшению турбулентного перемешивания по вертикали и его увеличению по горизонтали.
- Несмотря на то, что устойчивые ПСА могут становиться мелкими, до 10 м, данные наблюдений показывают, что в них по-прежнему существует развитая турбулентность.

- Сильная устойчивость в ПСА с одной стороны приводит к подавлению вертикального турбулентного перемешивания, с другой стороны, ведет к увеличению вертикального сдвига ветра и, значит, к увеличению продукции турбулентной кинетической энергии (ТКЭ).
- Такое влияние стратификации увеличивает нерегулярность турбулентности и приводят к перемежаемости турбулентности.
- Вклад внутренних волн и их обрушение усложняет процессы в устойчивом ПСА.
- Следует отметить, что такие явления в устойчивых пограничных слоях, как пространственная анизотропия и взаимодействие турбулентности и внутренних волн, относятся к наиболее трудным для математического моделирования.
- Оба процесса характеризуются сильной нелинейностью и трудны для аналитических теорий. Поэтому большинство моделей турбулентности либо игнорируют указанные процессы, либо включают их, используя очень простые аппроксимации.

- Данная работа применяет спектральный алгоритм, в котором поля скорости и температуры отображается на квази-Гауссовы поля, чьи гармоники описываются уравнениями Ланжевена.
- Для расчета параметров отображения используется процедура последовательного исключения мелкомасштабных мод скорости и температуры, что приводит к уравнениям для более крупномасштабных гармоник.
- Следует отметить, что такая процедура учитывает совместный вклад турбулентности и внутренних волн, и что пространственная анизотропия турбулентности явно разрешается.
- При распространении процесса последовательного исключения мелкомасштабных мод до самых больших масштабов, спектральный алгоритм дает новую модель турбулентности.
- Эта модель была применена в схеме пограничного слоя атмосферы моделей COSMO-RU и ICON-Ru.

Алгоритм спектрального замыкания применяется для трехмерной, несжимаемой атмосферы с наложенным однородным по вертикали устойчивым градиентом температуры. В исходную систему входят уравнения скорости, температуры, неразрывности в приближении Буссинеска:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} - \alpha g \mathcal{G} \mathbf{e}_3 = \nu_0 \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{f}^0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\mathcal{G} - \frac{d\theta}{dz} u_3 = k_0 \nabla^2 \mathcal{G}; \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{u} и \mathcal{G} – флуктуации компонент скорости и потенциальной температуры; P – давление; ρ – фоновая плотность; g – ускорение свободного падения; $d\theta/dz$ – вертикальный градиент невозмущенной (фоновой) потенциальной температуры; ν_0 и k_0 – молекулярная вязкость и теплопроводность; α – коэффициент термического расширения; \mathbf{f}^0 – крупномасштабное внешнее воздействие (форсинг), которое возникает из-за крупномасштабных сдвиговых неустойчивостей и поддерживает турбулентность в статистически устойчивом состоянии. Форсинг воздействует

- Из-за сильных нелинейных взаимодействий, внешнее возбуждение воздействует на все моды Фурье вплоть до масштаба диссипации.
- Моды случайно возбуждают друг друга, при этом одновременно происходит и их случайное ослабление (затухание).
- В статистически установившемся состоянии, процессы возбуждения и затухания мод находятся в балансе друг с другом, т.е. каждая мода Фурье получает и теряет одинаковое, в статистическом смысле, количество энергии.
- Принимая во внимание двойственность между нелинейными взаимодействиями и стохастическим возбуждением и затуханием, нелинейное слагаемое в уравнении (1) может быть заменено случайным модальным форсингом, а затухание представляется турбулентной вязкостью.
- В результате получим линейное уравнение со стохастическим форсингом и затуханием, известном как уравнение Ланжевена

$$u_i(\mathbf{k}, \omega) = G_{ij}(\mathbf{k}, \omega) f_j(\mathbf{k}, \omega) \quad (4)$$

- Следуя Kraichnan (1987), переход к уравнению Ланжевена может рассматриваться как метод, который способствует замене первоначального нелинейного уравнения Навье-Стокса, линейным стохастическим уравнением с форсингом, в котором бюджет энергии систематически поддерживается для каждой моды Фурье.
- Аналогичное выражение можно записать и для потенциальной температуры. При этом форсинг считается квази-Гаусовым. Именно это позволяет вывести коэффициенты турбулентного перемешивания скорости и потенциальной температуры. Вывод функций Грина для скорости и температуры для системы уравнений (1) – (3) дан в нашей ранее опубликованной работе

- Расчет параметров вихрей происходит при помощи алгоритма последовательного осреднения по малым интервалам гармоник скорости и температуры, которые, используя уравнения Ланжевена, дают малые приращения в коэффициенты турбулентного перемешивания по вертикали и горизонтали. Этот алгоритм, подробно описанный в нашей опубликованной работе, приводит к системе четырех обыкновенных дифференциальных уравнений для v_z, v_h, k_z, k_h :

$$\frac{d}{dk}(v_z, v_h, k_z, k_h) = -c \frac{\varepsilon}{k^5} F_{1,2,3,4}(v_z, v_h, k_z, k_h) \quad (5)$$

- где v_z и k_z - коэффициенты турбулентного перемешивания скорости и температуры по вертикали соответственно, v_h и k_h коэффициенты турбулентного перемешивания скорости и температуры по горизонтали. $F_1 - F_4$ трансцендентные выражения, $c = 0.7$.

- Вычисления коэффициентов турбулентности начинаются с масштаба Колмогорова k_d , где начальные значения v_z и k_z равны их молекулярным v_0 и k_0 и продолжаются до самых больших масштабов турбулентности, доступных в системе. Такой подход дает новые коэффициенты турбулентности.
- Для описания турбулентности в атмосфере, модели прогноза используют вертикальные и горизонтальные коэффициенты турбулентности. Центральной задачей при прогнозировании процессов в пограничном слое атмосферы (ПСА) является вычисление вертикальных коэффициентов турбулентности для скорости ветра K_M , температуры и влажности K_H . В широко используемой (в том числе и в COSMO-Ru) модели турбулентности Меллора и Ямады эти коэффициенты имеют вид:

$$K_M = q l S_M \quad (6)$$

$$K_H = q l S_H \quad (7)$$

где $q^2 = 2 TKE$ (TKE – турбулентная кинетическая энергия); l – турбулентный масштаб длины (путь смешения).

S_M и S_H - функции устойчивости (зависящие от стратификации), определяются как решения системы первых двух обыкновенных дифференциальных уравнений из (5). Заменяем S_M и S_H в (6) – (7) на функции, полученные в спектральном алгоритме:

$$S_M = \frac{v_z}{v_n}, \quad (8)$$

$$S_H = \frac{K_z}{v_n}, \quad (9)$$

где $v_n = q l$ – вертикальный коэффициент для момента в нейтральном случае.

Система уравнений (5) решалась численно. Результаты численного решения 1–2 уравнений из (5), т.е. S_M и S_H как функции числа Ричардсона (Ri) представлены на рис. 1. Здесь же представлены S_M и S_H из работы, использующиеся в настоящее время в модели COSMO-Ru. Видно, что при $Ri = Ri_{cr} \sim 0.3$, S_M и S_H из Меллора-Ямады принимают нулевые значения и не могут использоваться в расчетах. В этих случаях, значения функций устойчивости в ряде моделей численного прогноза погоды заменяются на некие постоянные минимальные значения (например $S_H = 0.4$), которые не зависят от стратификации, сезона и области счета.

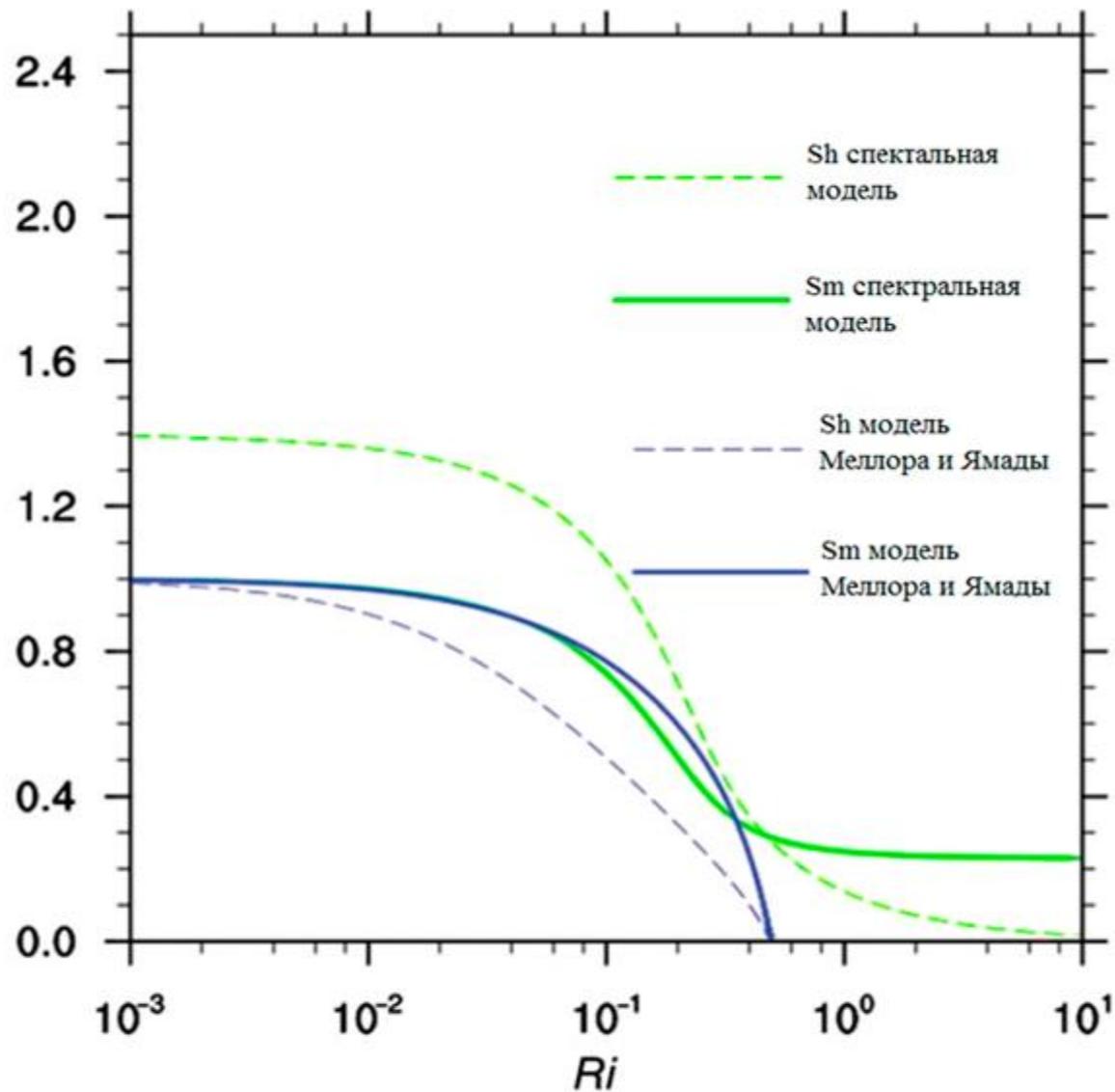


Рис. 1. Функции устойчивости S_m , S_h полученные на основе модели Меллора-Ямады и спектрального алгоритма (модели), использующиеся для вычисления вертикальных коэффициентов турбулентности.

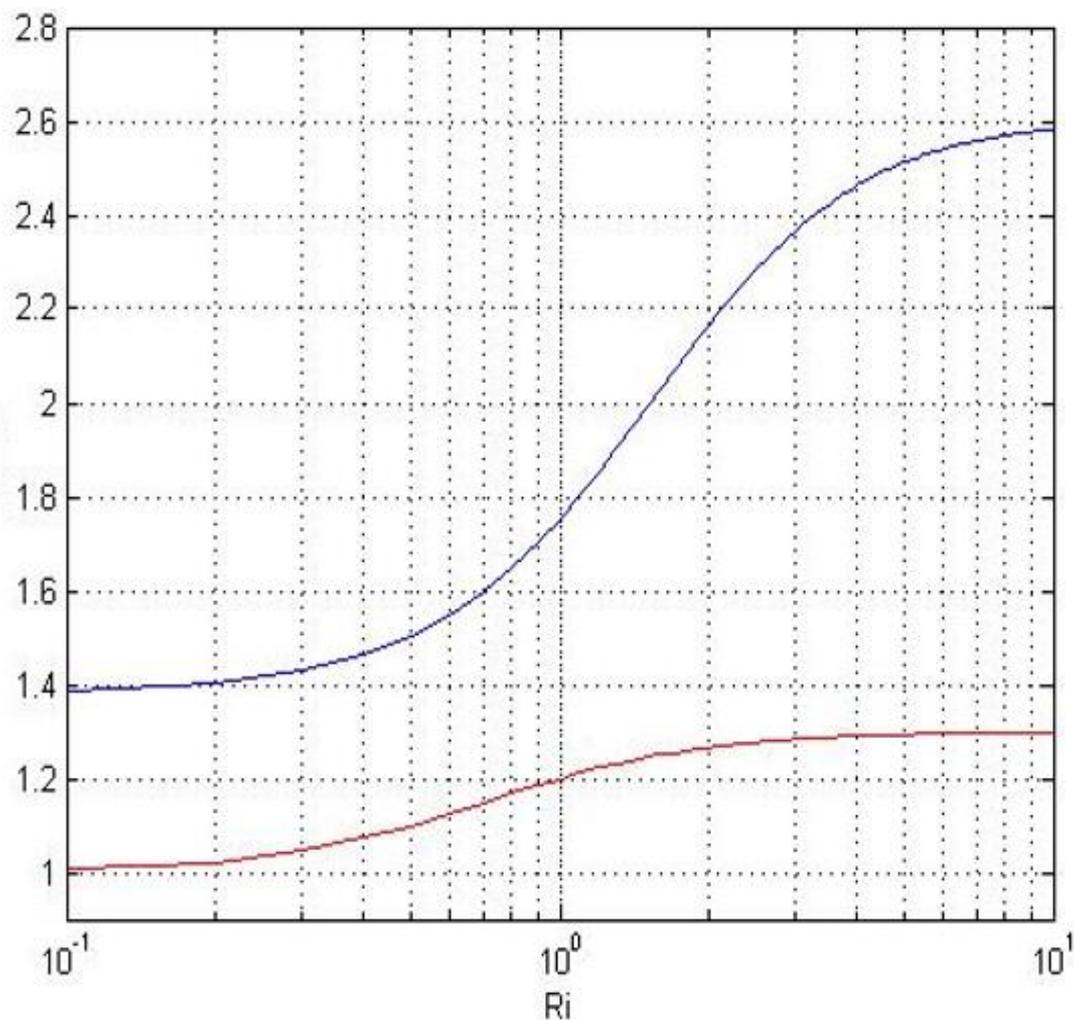


Рис. 2. Функции устойчивости Sh_m (красная кривая) и Sh_h (синяя кривая), полученные на основе спектрального алгоритма (модели), как функции числа Ri .

Параметризация приземного слоя

- Коэффициенты переноса импульса, тепла и влаги относятся к основным составляющим численного прогнозирования погоды и климатических моделей. Они необходимы для расчета турбулентных потоков в приземном слое и часто опираются на теорию подобия Монина-Обухова, требуя универсальных функций устойчивости.
- Проблема вывода коэффициентов переноса основанных на различных функциях устойчивости, рассматривалась многими исследователями на протяжении лет, но она остается актуальной и по сей день.
- В данной работе мы получаем коэффициенты передачи по трем теоретическим функциям устойчивости.
- Мы строим неитеративные параметризации этих коэффициентов переноса на основе более ранних работ.
- Одна схема показывают хорошее согласие с данными SHEBA для морского льда

Реализация спектрального алгоритма в схеме турбулентности модели COSMO-Ru

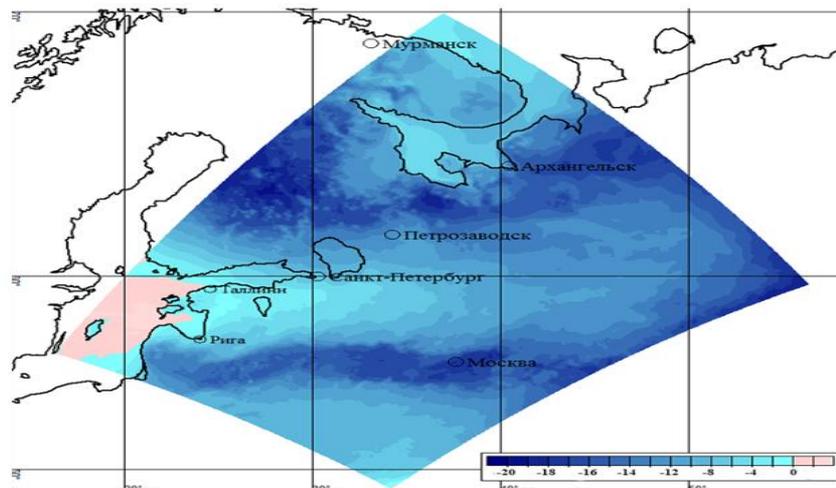


Рис. 3 Поле температуры T_{2m} в варианте с исходной параметризацией турбулентности, для 24.01.2018, прогноз на 12 час.

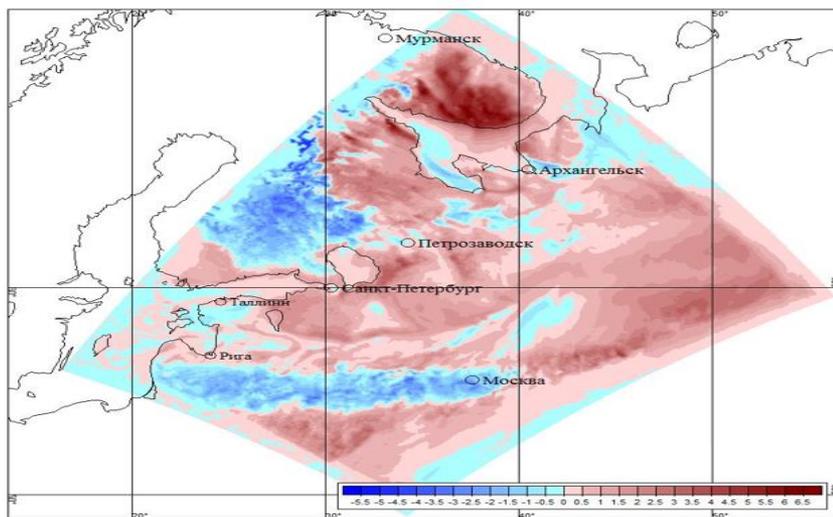


Рис. 4 Поле разности $T_{2m}^{нов} - T_{2m}^{иск}$ для 24.01.2018, прогноз на 12 час.

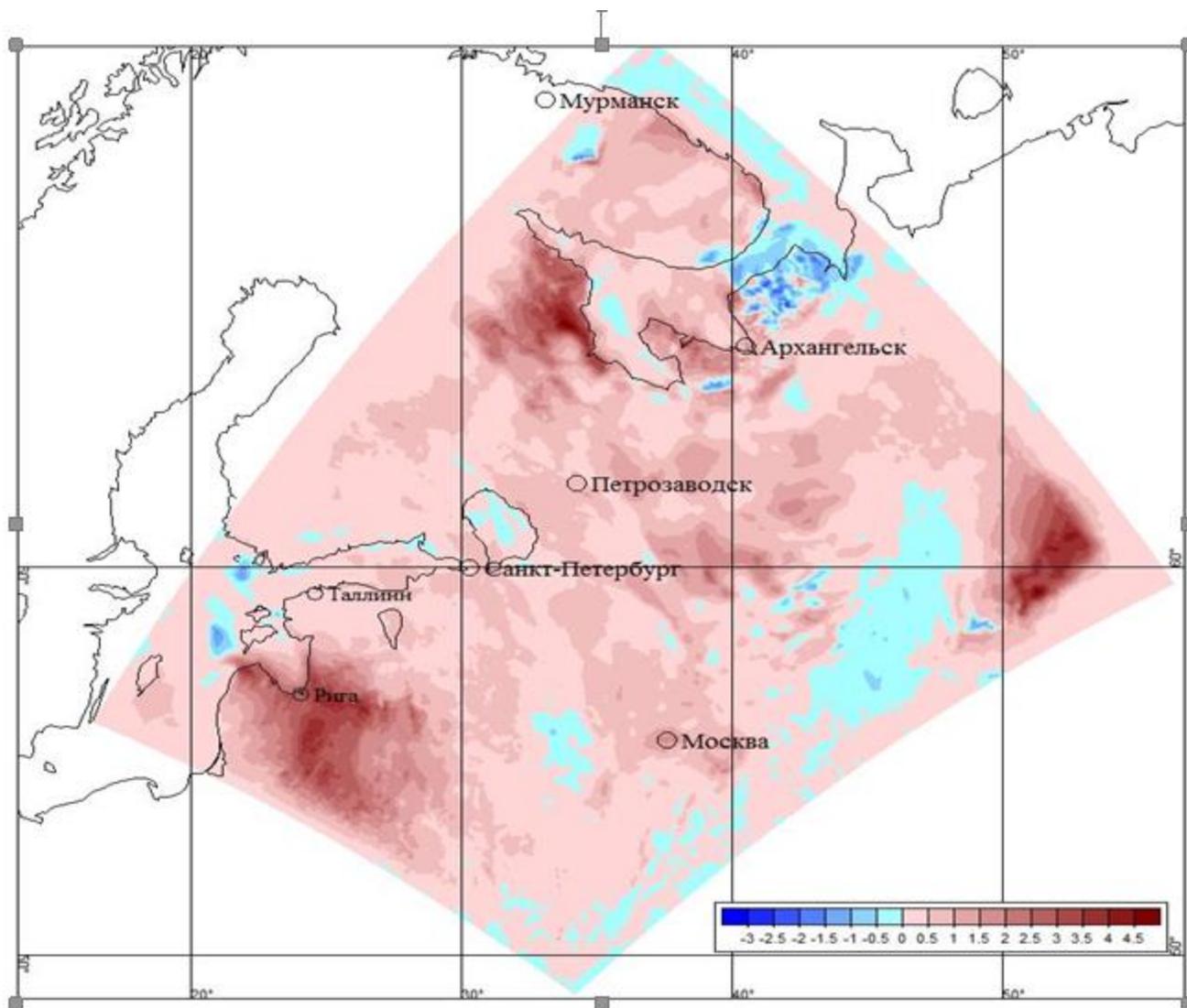
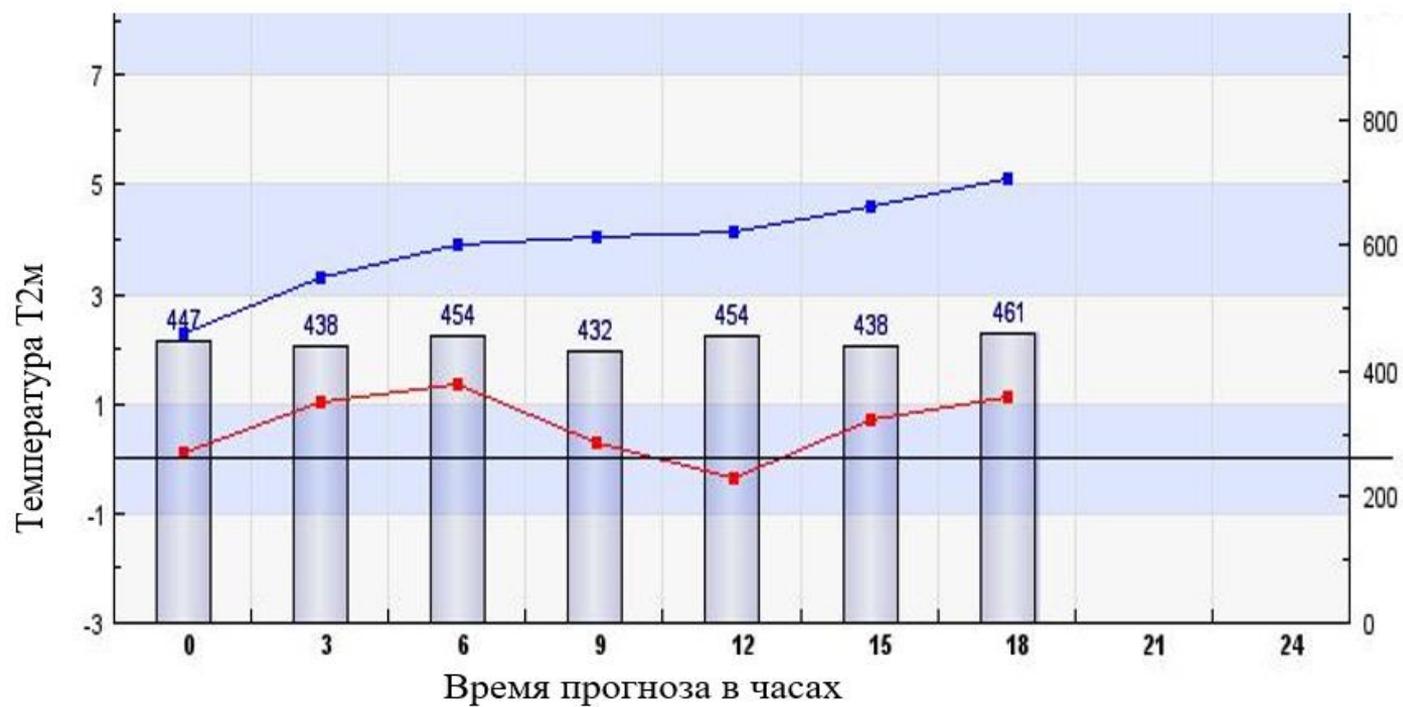
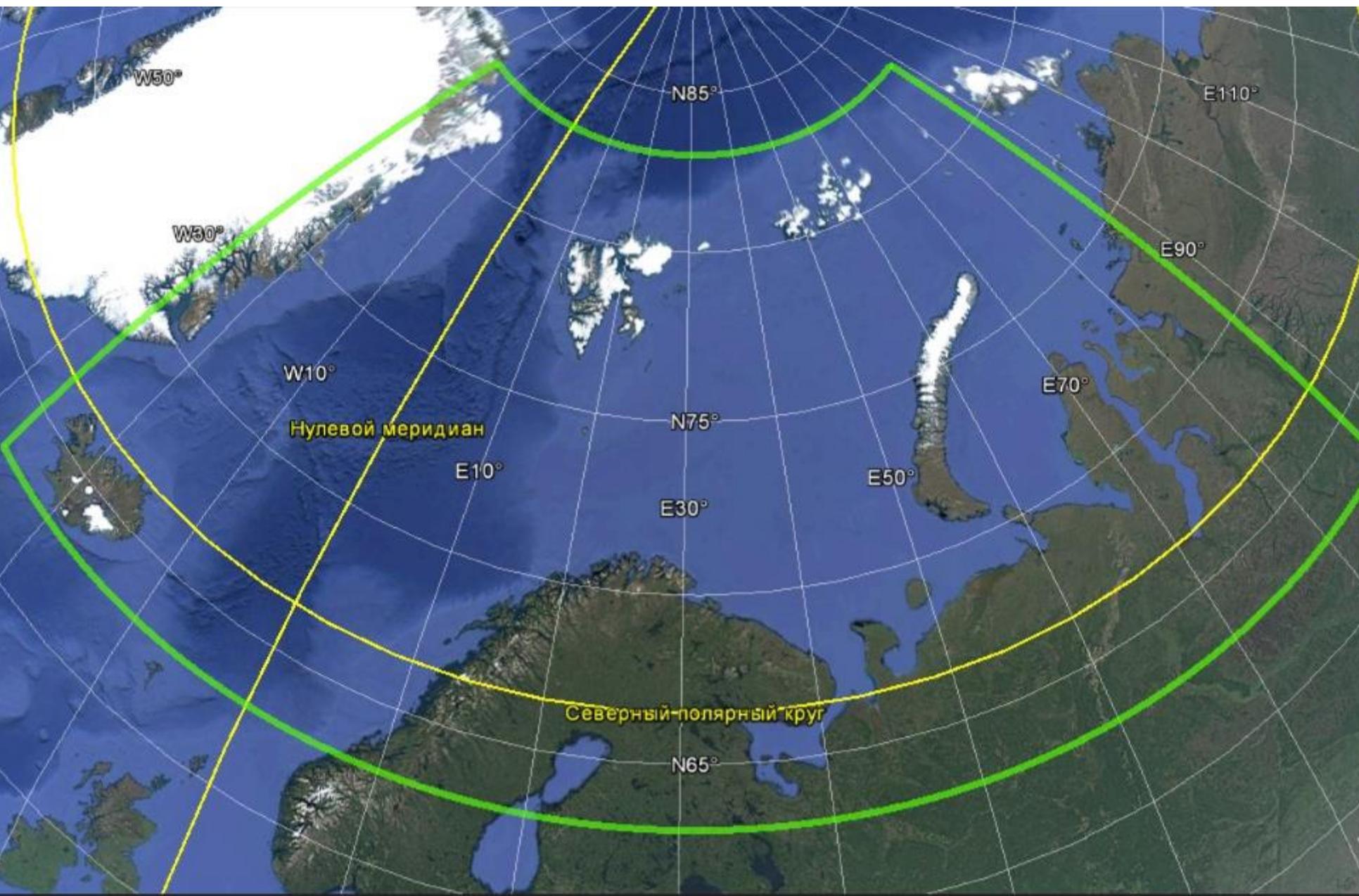
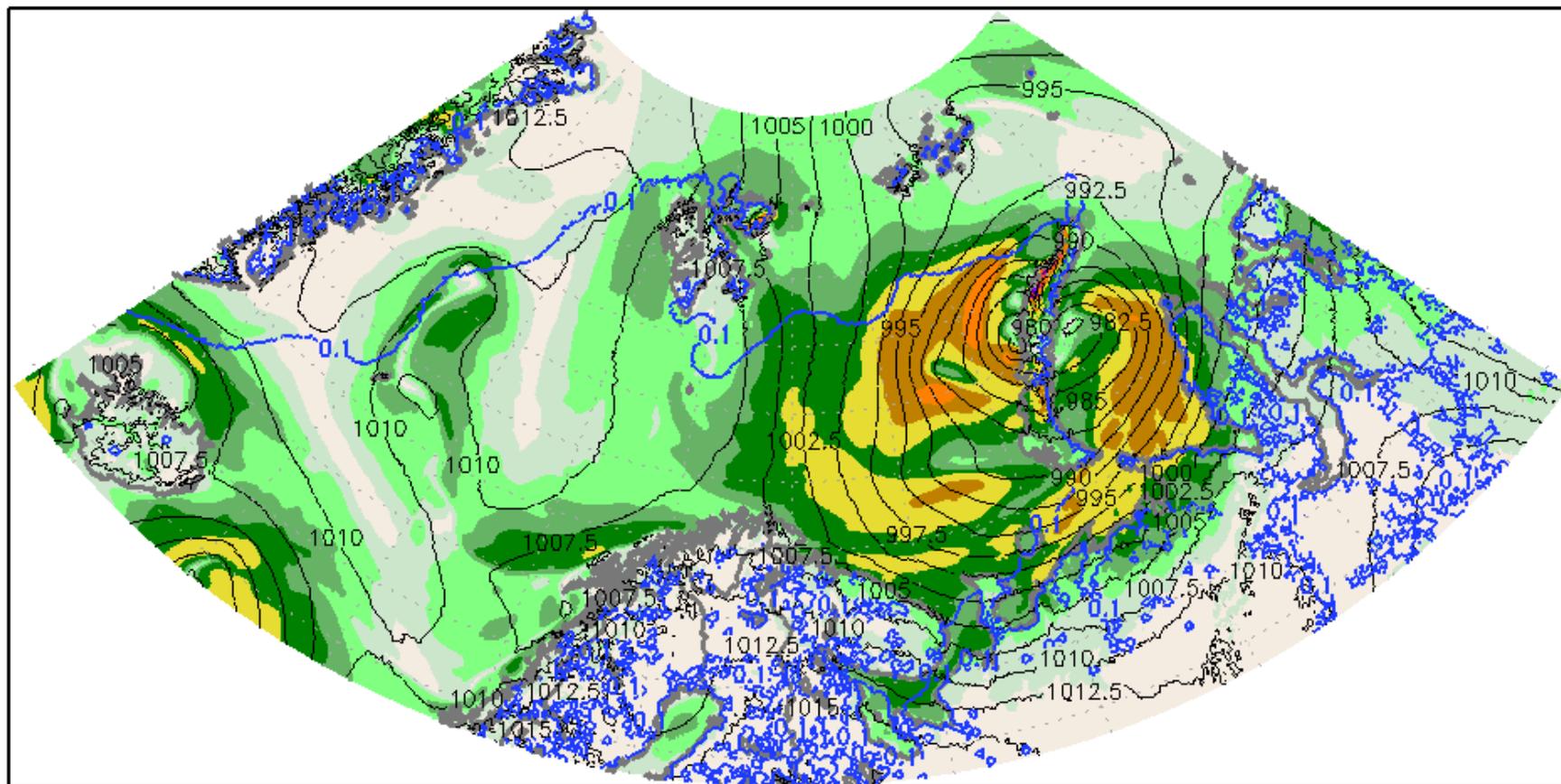


Рис 5. Поле разности $T_{2M}^{нов} - T_{2M}^{исх}$ для 01.01.2018, прогноз на 12 час.





Скорость ветра и PMSL, WestArctic, 12Z05JAN2024



Заключение

- Учет анизотропности и процессов различного пространственного масштаба позволяет учитывать более корректные коэффициенты турбулентного переноса. Рассчитанные нами прогнозы показывают возможность уточнения прогноза погоды в пограничном слое атмосферы, что может быть широко использовано на практике.
- Подтверждена корректность отказа от дальнейшего использования критического числа Ричардсона для устойчивой температурной стратификации ПСА и сильно устойчивой температурной стратификацией. Полученные без использования такого ограничения прогнозы корректны. Это обуславливается совокупностью характерных особенностей предложенных коэффициентов функции стабильности.

