

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное агентство по образованию  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.511.072

**НГО ДИТЬ ХИ**

**МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ВЬЕТНАМА**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор,  
Гаврилов Александр Сергеевич.

Официальные  
оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор,

Вагер Борис Георгиевич, СПб ГАСУ.  
Кандидат физико-математических наук  
Павловский Артем Александрович, СПб ГКУ  
«НИИЦ Генплана Санкт-Петербурга».

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное  
образовательное учреждение высшего  
образования ВУНЦ ВМФ «Военно-морская  
академия имени Адмирала Флота Советского  
Союза Н.Г. Кузнецова МО РФ»

Защита состоится \_\_\_\_ декабря 2016 г. в \_\_\_\_ часов \_\_\_\_ минут на заседании  
диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном  
гидрометеорологическом университете по адресу:

**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 633-01-82,  
372-50-92**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского  
государственного гидрометеорологического университета по адресу:

**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.**

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу 192007, Россия, Санкт-  
Петербург, Воронежская улица, дом 79. Российский государственный  
гидрометеорологический университет, Диссертационный совет Д.212.197.01,  
Ученому секретарю.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.м.н., доцент

Л.В. КАШЛЕВА

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Вьетнамская народная республика - страна с выраженным экономическим ростом и значительным ростом потребления электроэнергии, как и многие другие страны региона (Китай, Бангладеш), не располагающие доступными углеводородными ресурсами, приступила в настоящее время к созданию собственной атомно-энергетической промышленности.

В соответствие с документами, ратифицированными парламентом Вьетнама, к 2020 году запланирован ввод в эксплуатацию двух атомных электростанций (АЭС) с 4 реакторами суммарной мощностью более 4000 мегаватт, что в ближайшее десятилетия даст мощный стимул развития промышленности на юге Вьетнама. Одна из этих АЭС планируется к проектированию и строительству российскими специалистами (АЭС Ниньтхуан-1), а вторая – японскими (АЭС Ниньтхуан-2). Обе АЭС предполагается разместить весьма компактно (на расстоянии около 20км) на побережье Южно-китайского моря в провинции Ниньтхуан на засушливой территории, по своим климатическим особенностям не вполне пригодной для ведения сельского хозяйства, а значит и малонаселенных.

Трудности этого процесса для развивающейся страны, находящейся к тому же, в тропической зоне, вполне очевидны. В первую очередь, это отсутствие в этом регионе достаточно густой наблюдательной метеорологической сети (тем более – на малонаселенных территориях), а также наработанных методик гидрометеорологического обеспечения безопасности АЭС для тропической зоны. Для территории Вьетнама, представляющей собой сравнительно узкую полосу суши с горными хребтами вдоль побережью Южно-китайского моря, сюда добавляются еще и необходимость разработки упомянутых методик для территорий с выраженной пространственной неоднородностью. Тем более, это относится к площадке АЭС Ниньтхуан-1, для которой в зоне влияния АЭС (около 30км) присутствуют и невысокие (до 1 км) горы и холмы, а также береговая линия.

Условия распространения и рассеяния аварийного выброса в атмосфере характеризуются, как известно, так называемыми «факторами разбавления и осаждения», представляющими собой величины интеграла концентрации радионуклидов и интенсивности их осаждения на поверхность при единичной мощности аварийного выброса.

Согласно требованиям Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ) и российских нормативных документов оценка радиационной обстановки при проектных и запроектных авариях на АЭС должна выполняться для наименее благоприятных метеорологических условий, характерных для района размещения АЭС.

Понятие «неблагоприятных метеорологических условий» подразумевает в этом случае определение на различных расстояниях от АЭС максимальных значений факторов разбавления и осаждения с процентной обеспеченностью до 99.5%. Получение статистических характеристик столь высокого уровня

обеспеченности (так называемых «редких событий»), требует, в свою очередь, наличия весьма длительных наблюдений (5-8 лет) на площадке АЭС, которые, однако, на стадии проектирования по понятным причинам отсутствуют. Именно поэтому расчетные (прогностические) методы оценки подобных величин становятся единственно возможными.

Для расчета факторов разбавления и осаждения примеси широкое распространение на практике в силу своей простоты и прозрачности результатов получила Гауссова модель атмосферной диффузии с формулами Смита-Хоскера и Бриггса для параметров рассеяния как функций расстояния от источника и категории устойчивости атмосферы по классификации Пэскуилла – Гиффорда. Данная модель рекомендована для практического применения для расстояний не более 30 км от источника всеми международными организациями, включая Всемирную метеорологическую организацию (ВМО), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, Всемирную организацию здравоохранения (ВОЗ).

**Общей целью работы** являлись разработка и апробация трехмерной гидротермодинамической модели нижней тропосферы над поверхностью со сложной орографией и наличием раздела «суша-море» (на примере зоны влияния АЭС Ниньтхуан-1), а также приложение этой модели для оценки локальных статистических характеристик атмосферы, определяющих условия переноса и рассеяния радионуклидов от выбросов АЭС.

**Исходя из общей цели, в работе решались следующие задачи:**

- обоснование принципиальных возможностей применения современных методов моделирования атмосферного пограничного слоя (АПС), отработанных для умеренной зоны, к тропической зоне Вьетнама;
- разработка метода описания рельефа произвольной конфигурации применительно к 3D гидротермодинамическим моделям;
- разработка и верификация данного метода в 3D численной модели на основе сопоставления результатов моделирования с натурным экспериментом по продувкам упрощенных форм рельефа в аэродинамической трубе;
- разработка комбинированной 3D гидротермодинамической численной модели нижней тропосферы над поверхностью с произвольной конфигурацией рельефа, береговой черты, а также характеристик шероховатости подстилающей поверхности;
- проведение комплекса численных экспериментов применительно к территории зоны влияния АЭС Ниньтхуан-1 для оценки чувствительности результатов расчета для типичных погодных ситуаций к учету рельефа и бризовой циркуляции на формирование характеристик атмосферы, определяющих условия рассеяния радионуклидов;
- разработка метода пересчета известных статистических характеристик поля ветра на уровне 850гПа (по данным архива реанализа атмосферных процессов) в неизвестные из наблюдений статистические характеристики поля

ветра, вертикальной скорости и характеристик устойчивости в зоне распространения облака аварийного выброса АЭС.

**Методической основой** диссертационного исследования послужили современные требования по безопасности АЭС, достижения в области физики атмосферного пограничного слоя и численного моделирования атмосферных процессов.

**Методологической основой** диссертационного исследования послужили труды российских и зарубежных ученых как в области обеспечения безопасности ядерных объектов (Пэскуилл, Гиффорд), так и в области физики атмосферного пограничного слоя (А.С. Монин, А.М. Яглом, Дж.А. Бузингер, Дж.К. Вингаард, Р.Дж. Лэм, С.Р. Ханна, Д.Л. Лайхтман, С.С. Зилитинкевич, Б.Г. Вагер, А.С. Гаврилов) и численного моделирования (Г.И. Марчук, Р. Роуч, А. Алоян).

**Исходные данные** для расчетов включали сведения о рельефе подстилающей поверхности, климатические характеристики температуры воздуха и воды по данным ближайшей метеостанции, а также данных реанализа атмосферных процессов на стандартных изобарических поверхностях за период 2009-2015 г.г.

**Научная новизна** работы обусловлена следующим:

1. Впервые, на основании изучения точности выполнимости геострофического соотношения, выявлен нижний предел широты местности в тропической зоне применительно к Вьетнаму, где структура АПС еще сохраняет свойства умеренной зоны.

2. Впервые предложен, программно реализован и верифицирован метод построения цифровой модели рельефа для неоднородностей произвольной конфигурации, пригодный для учета рельефа в 3D гидротермодинамической модели.

3. Впервые предложен и реализован метод получения статистических характеристик поля ветра и категории устойчивости приземного слоя (ПС) с использованием 3D гидродинамической модели в условиях выраженной пространственной неоднородности подстилающей поверхности только на основе доступных архивов данных реанализа атмосферных процессов на изобарических поверхностях 925,850 и 700 гПа (без данных метеостанции).

**Практическая значимость работы** заключается в следующем.

На основе разработанных и верифицированных алгоритмов расчета удастся решать проектные задачи получения обеспеченных статистических характеристик поля ветра и категорий устойчивости Пэскуилла – Гиффорда как на площадке строительства АЭС, так и на прилегающей территории, на которых предварительные метеорологические наблюдения отсутствуют. Проведенные исследования позволят обеспечить требуемых нормативными документами максимальных значений факторов разбавления/осаждения радионуклидов высоких уровней обеспеченности (до 99.5%) от аварийных выбросов АЭС, необходимых для обеспечения безопасности функционирования АЭС.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты разработки и верификации метода построения цифровой модели рельефа для расчета трехмерной структуры полей ветра и температуры над орографически неоднородными поверхностями в прибрежной зоне;

2. Результаты обработки данных численных экспериментов применительно к территории зоны влияния АЭС Ниньхуан-1 по оценке их чувствительности к учету рельефа и бризовой циркуляции на формирование характеристик атмосферы, определяющих условия рассеяния радионуклидов;

3. Результаты пересчета с помощью модели известных статистических характеристик поля ветра на уровне 850гПа (по данным архива реанализа атмосферных процессов) в неизвестные из наблюдений статистические характеристики скорости и направления ветра, вертикальной скорости и характеристик устойчивости в зоне распространения облака аварийного выброса АЭС.

**Достоверность результатов** определяется использованием современных методов численного моделирования атмосферных процессов, обоснованием точности получаемых результатов на основе многоступенчатого тестирования алгоритмов, а также результатами верификации на экспериментальном материале.

**Апробация результатов.** Материалы диссертации докладывались на Итоговых сессиях Ученого Совета РГГМУ в 2014 и 2015 годах, а также на научных семинарах кафедры МКОА РГГМУ.

**Публикации.** По теме диссертации имеется 3 публикации в рецензируемых журналах из Перечня ВАК.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в формулировке задач работы, разработке и практической реализации позиций, выносимых на защиту, тестировании и верификации расчетных моделей, подготовке исходных данных, а также проведении комплекса расчетов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, описываются проблемы, ставятся задачи диссертационного исследования, обосновывается научная новизна полученных результатов, их практическая значимость и определяются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе диссертации** рассмотрены особенности топографии и климата Вьетнама, а также определяемые этими особенностями условия рассеяния радионуклидов в атмосфере. На территории Вьетнама, как известно, существует два типа циркуляции – это пассатная, характерная для экваториальной зоны, и муссонная циркуляция.

В зоне пассатов нарушается характерный для умеренной зоны примерный баланс сил барического градиента и Кориолиса, вследствие чего хорошо изученная в умеренной зоне вертикальная структура атмосферного пограничного

слоя (АПС) претерпевает те или иные изменения, связанные, в первую очередь, с особенностями поворота ветра с высотой (экмановский пограничный слой).

В связи с необходимостью адаптации для территории Вьетнама отработанных для умеренной зоны методик расчета характеристик переноса и рассеяния радионуклидов от источников типа АЭС, было проведено специальное исследование по выделению диапазона широт в окрестности Вьетнама, где примерный баланс сил барического градиента и Кориолиса еще наблюдается.

В качестве исходных данных для решения поставленной задачи использовались данные реанализа атмосферных процессов применительно к изобарической поверхности 850 гПа (высота около 1.5 км) Национального центра по прогнозированию окружающей среды (NCER, США). Для этой цели был создан архив компонент скорости ветра и высоты геопотенциала для сроков 03, 09, 15 и 21 часов за период с 1.01.2006г. по 31.12. 2009г. с пространственной дискретностью 2.5 дуговых градуса.

На рисунке 1 приведены сводные широтные зависимости рассчитанных коэффициентов корреляции для  $105^0 - 115^0$  в.д.

Как можно видеть из рисунка 1, для широт севернее  $7.5^0$  с.ш. геострофическое соотношение, в целом, достаточно хорошо выполняется (коэффициенты корреляции на уровне 0.65). Следует отметить, однако, что для условий суши (долгота  $105^0$  и  $107.5^0$  в.д.) выполнимость этого соотношения ухудшается и, особенно, оказывается плохой севернее  $20^0$  с.ш. Подобная ситуация определяется, скорее всего, влиянием на выполнимость геострофического соотношения горных массивов как на территории Вьетнама (особенно на широтах  $12-15^0$  с.ш.), так достаточно высоких и протяженных горных массивов южного Китая.

Как было показано, влияние сезонного фактора на упомянутые значения коэффициентов корреляции не столь значительно, как можно было это ожидать. В сухой сезон (зимний муссон), когда ветер направлен с суши на море и пересекает горные хребты в диапазоне широт 7.5-15 градусов северной широты, коэффициент корреляции оказывается ниже (около 0.5), чем в дождливый сезон (летний муссон), когда ветер направлен с моря на сушу (около 0.7).

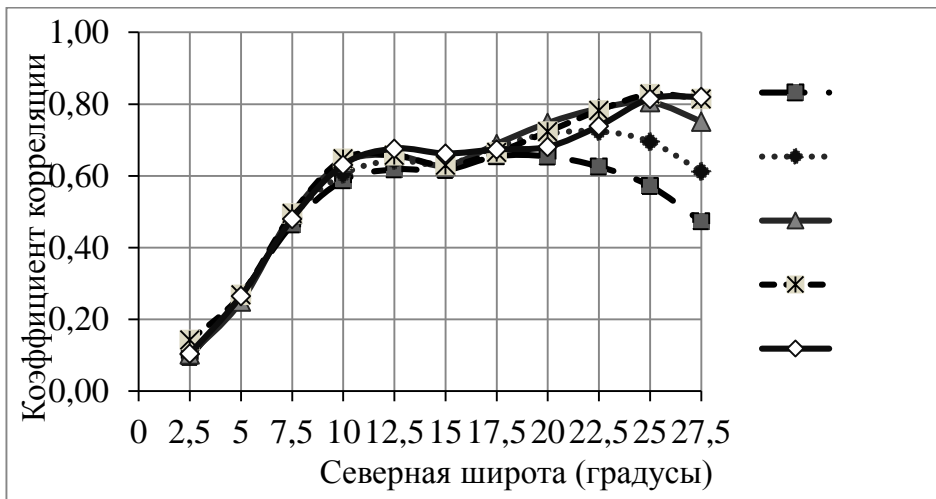


Рисунок 1 – Широтные зависимости коэффициентов корреляции для различной долготы (1-105<sup>0</sup>, 2-107.5<sup>0</sup>, 3 -110<sup>0</sup>, 4-112.5<sup>0</sup>, 5 – 115<sup>0</sup> в.д.).

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что для почти всей территории Вьетнама в диапазоне от 7<sup>0</sup> до 20<sup>0</sup> с.ш. геострофические соотношения выполняются с достаточной точностью (хотя и несколько хуже, чем в умеренной зоне), а значит и закономерности формирования атмосферного пограничного слоя в зоне строительства АЭС Ниньтуан-1 остаются такими же, как и в областях, для которых справедливы, в частности, методические материалы по расчету рассеяния радионуклидов, разработанные для умеренной зоны.

В разделе 1.3 диссертации конкретизируются характеристики атмосферы, влияющие на перенос и рассеяние радионуклидов. За основу здесь принят вариант гауссовой модели турбулентной диффузии, реализованный в национальном стандарте РФ – методике МПА-98.

Эта методика разрабатывалась применительно к сравнительно однородной местности и требует, вообще говоря, в качестве исходных данных следующие:

- статистику скорости ветра для каждого румба;
- статистику категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда;
- статистику интенсивности осадков.

Над неоднородной подстилающей поверхностью здесь важен еще и учет возникающих при этом вертикальных скоростей

Категории устойчивости атмосферы Пэскуилла-Гиффорда – неотъемлемая часть всех вариантов как начальных, так и современных гауссовских моделей, поскольку в зависимости от этой категории используется различное описание характера горизонтального и вертикального турбулентного рассеяния примесей. Они имеют литеральные обозначения: “А” – свободная конвекция, “В” –



конвекция, "С" – вынужденная конвекция, "D" – нейтральная стратификация, "E" – слабая устойчивость, "F" – устойчивая стратификация, "G" – сильная устойчивость и оцениваются исходя из вертикального градиентов температуры и скорости ветра.

Для условий выраженной горизонтальной неоднородности подстилающей поверхности в окрестности АЭС Ниньтуан-1 требуется, однако, задание всех перечисленных параметров не просто для одной точки (обычно- точки расположения источника), а в целом, для всей области возможного отрицательного воздействия выбросов АЭС на окружающую среду.

Поскольку экспериментальным путем это сделать невозможно, то остается только один способ – использовать для этого математическую модель нижней тропосферы высокого пространственного разрешения, учитывающей как разности температур «суша-море», так и элементов рельефа на скорость и направление ветра, интенсивность вертикальных токов, а также характеристики устойчивости атмосферы.

**Во второй главе** излагается общая формулировка используемой в работе 3D гидротермодинамической модели атмосферы на микромасштабах (от единиц метров до десятков километров) и вновь предложенного в диссертации метода описания в этой модели рельефа произвольной конфигурации.

Запишем систему осредненных уравнений динамики атмосферы для компонент вектора скорости ( $u_1 = u$ ,  $u_2 = v$ ,  $u_3 = w$ ) и отклонений потенциальной температуры ( $\mathcal{G}$ ) от своих фоновых значений ( $\bar{\theta}$ ) на вращающейся Земле в системе декартовых координат  $x_i$ , направив ось  $x_1 \equiv x$  для определенности на восток, ось  $x_2 \equiv y$  на север, а  $x_3 \equiv z$  вертикально вверх (формулы (1) – (12)):

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \tilde{u}_\alpha \frac{\partial u_1}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_1} + l(u_2 - V_G) - \frac{\partial R_{1\alpha}}{\partial x_\alpha}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + \tilde{u}_\alpha \frac{\partial u_2}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_2} - l(u_1 - U_G) - \frac{\partial R_{2\alpha}}{\partial x_\alpha}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + \tilde{u}_\alpha \frac{\partial u_3}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_3} + \beta \mathcal{G} - \frac{\partial R_{3\alpha}}{\partial x_\alpha}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} + \tilde{u}_\alpha \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x_\alpha} + \delta_{\alpha 3} \gamma_\theta \right) = \frac{\partial H_\alpha}{\partial x_\alpha}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad U_G = -\frac{1}{\bar{\rho}l} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_2}, \quad V_G = \frac{1}{\bar{\rho}l} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_1}, \quad (5), (6), (7)$$

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} = -\rho g, \quad (8) \quad \bar{\theta} = T \left( \frac{P_0}{\bar{P}} \right)^{R/C_p} \quad (9), \quad \bar{P} = \rho R T \quad (10)$$

$$P = \rho R T, \quad (11) \quad \gamma_\theta = \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_3}, \quad (12)$$

где  $\pi = (P - \bar{P}) / \rho$  – отклонение давления воздуха  $P$  от своей средней величины  $\bar{P}$ , нормированное на его плотность  $\rho$ ,

$R_{ij} \equiv \langle u'_i u'_j \rangle$  - тензор напряжений Рейнольдса (угловые скобки – признак осреднения),

$H_i \equiv \langle u'_i \mathcal{G} \rangle$  - вектор турбулентного потока тепла, нормированный на объемную теплоемкость,

$g$  – ускорение свободного падения,

$\beta = g/T$  - параметр плавучести,

$l$  – параметр Кориолиса ( $l = 2\omega \sin \varphi$ ,  $\omega$  - угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  - широта),

$R$  - газовая постоянная для сухого воздуха,

$C_p$  - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,

$P_0 = 1000 \text{ Па}$ ,  $\tilde{u}_1 = u_1 + U_G$ ,  $\tilde{u}_2 = u_2 + V_G$ ,  $\tilde{u}_3 = u_3$ ,

По индексу  $\alpha$  производится суммирование, а  $\delta_{ij}$  - единичный тензор (символ Кронекера):  $\delta_{ij} = 0$  при  $i \neq j$  и  $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ .

Уравнения (1)-(2) получены путем вычитания из исходных уравнений Рейнольдса для горизонтальных компонент скорости соответствующих геострофических соотношений (6) и (7), в предположении о независимости плотности воздуха от горизонтальных координат, а уравнение (3) – вычитанием из уравнения Рейнольдса для вертикальной скорости уравнения статики (8), которому, как обычно предполагается, удовлетворяет среднее давление  $\bar{P}$  при средней (фоновой) потенциальной температуре воздуха (12) и соответствующей ей молекулярно-кинетической температуре воздуха  $T$ .

Компоненты геострофической скорости ветра  $U_G, V_G$  играют здесь роль компонент фоновой горизонтальной скорости ветра и приняты, для простоты, не меняющимися с высотой, что, впрочем, несколько не ограничивает общность, поскольку в противном случае (например, при температурной адвекции в свободной атмосфере) их изменение с высотой совсем нетрудно учесть. То же относится и к фоновым значениям вертикальной скорости, которые предполагается еще и равными нулю.

Все фоновые величины предполагаются известными, поскольку определяются синоптическими процессами на масштабах сотни и тысячи километров и должны, таким образом, браться из соответствующих крупномасштабных моделей.

Аналогично получено и уравнение (4) для переноса в турбулентной атмосфере величин отклонения потенциальной температуры от фоновых своих значений (9), где для простоты учтен только вертикальный градиент фоновой потенциальной температуры (12), который, как известно, существенно превосходит аналогичные горизонтальные градиенты.

Параметризация подсеточной турбулентности предполагает использование

$$b^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sigma_i^2$$

упрощенной системы уравнения баланса турбулентной энергии в локально-равновесной форме с использованием приближения изотропной турбулентности для коэффициента турбулентного обмена  $K_{ij} = K \delta_{ij}$ , полуэмпирической гипотезы Колмогорова при использовании шага сетки  $\Delta$  в качестве масштаба турбулентности:

$$K = k \Delta^2 \left[ \left( \frac{dV}{dn} \right)^2 - \beta \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x_3} + \gamma_\theta \right) \right]^{1/2}, \quad (2.13)$$

$$R_{ij} = -K \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad H_i = -K \left( \frac{\partial \vartheta}{\partial x_i} + \gamma_\theta \delta_{i3} \right), \quad (2.14)$$

Здесь величина  $\frac{dV}{dn}$  - полный модуль локального градиента скорости ветра,

$k$  - эмпирическая константа.

Интегрирование (1) - (4) производится численно с шагом по времени  $\Delta_t$  до момента установления процесса обтекания участка территории. Величина  $\Delta_t$  выбирается на каждом временном шаге с учетом требований обеспечения вычислительной устойчивости для явных схем (критерий Куранта).

Для численного интегрирования (1) - (3) используется метод расщепления (Пененко В.В., Алоян А.Е., 1985). На первом полушаге (перенос и диффузия) здесь использовалась явная трехмерная конечно-разностная схема Лакса-Вендрофа (Роуч П., 1980) в ее двухслойной интерпретации. На втором полушаге (согласование поля ветра и давления) численно интегрировалось уравнение Пуассона для отклонений от давления, которое легко получить путем применения оператора дивергенции к уравнению (15), для чего применялся известный итерационный метод последовательной верхней релаксации.

Учет рельефа осуществлялся с привлечением так называемого «метода фиктивных областей», общая концепция которого предполагает наличие некоторой совокупности узлов расчетной сетки, помещаемых внутрь того или

иного препятствия и в которых никакие вычисления не производятся. Проблема состоит в описании ограничивающей это препятствие поверхности, на которой требуется, к тому же, ставить граничные условия. В работе [2] нами был предложен специальный метод такого рода описания, пригодный также и к описанию достаточно тонких (толщиной менее шага сетки) ограждений, суть которого состоит в задании в граничных к поверхности узлах длин и направляющих углов нормалей к этой поверхности (рисунок 2).

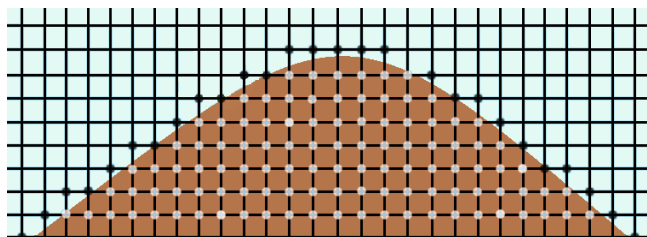


Рисунок 2 – Общая схема идентификации ограждающей поверхности элемента рельефа в методе фиктивных областей. Внутренние точки – белые, прилегающие к поверхности узлы сетки выделены черным.

Наибольшую сложность представляет собой построение собственно гладкой поверхности внешнего ограждения элемента рельефа. Поскольку рельеф для каждой местности задается в форме изолиний его высоты, требуется реализовать некоторую процедуру построения на этой основе непрерывной поверхности. Используемый нами метод реализации подобной процедуры предполагал комбинирование этой поверхности из совокупности плоскостей треугольной формы, таким образом, как это показано на рисунке 3.

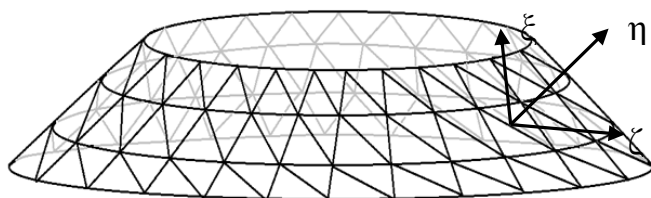


Рисунок - 3 – Схема комбинирования ограждающей поверхности элемента рельефа по произвольной конфигурации его изолиний с примером построения локальной системы координат.

Таким образом, в данной цифровой модели вся информация о конфигурации рельефа включала лишь координаты угловых точек (L) каждого

треугольника (k) -  $(x_L^{(k)}, y_L^{(k)}, z_L^{(k)})$ . Далее, для каждой новой формы конфигурации рельефа реализовывалась специальная вычислительная процедура построения нормалей к такого рода треугольникам из ближайших узлов расчетной сетки, характеристики которых (длина, горизонтальный и вертикальный углы) и представляли уже итоговую цифровую модель рельефа, которая и использовалась при задании граничных условий для компонент скорости ветра, температуры и давления

В разделе 2.5 подробно описаны примененные способы постановки краевых условий. В качестве начальных условий используем вертикальные профили скорости ветра и температуры, восстановленные по данным реанализа с использованием модели АПС над горизонтально-однородной поверхностью (Гаврилов А.С., Мханна, 2006), причем вертикальная скорость при этом полагалась равной нулю.

На верхней границе расчетной области, располагаемой на высоте как минимум в 2-3 раз превышающих высоту самой высокой точки рельефа, все отклонения от фоновых значений полагались равными нулю, а на боковых поверхностях расчетной области полагались нулю все производные от искомым величин по нормали к этим поверхностям.

Для задания граничных условий на подстилающей поверхности использовались приближения теории подобия Мони́на-Обухова (Монин А.С., Яглом А.М., 1965) для горизонтально однородного стратифицированного приземного (приводного) слоя. При этом учитывалось, что доступной информацией здесь являются лишь сведения о шероховатости подстилающей поверхности, температуры поверхности воды (если в область расчета попадает водная среда), а также данные о температуре воздуха.

Для верификации предложенной модели использовались экспериментальные данные по продувкам элементов рельефа в аэродинамической трубе (Lawson R. E., Jr, Snyder W. H. and Thompson R. S, 1989). Рассматривался одиночный осесимметричный холм, высота которого  $h$  в пересчете на реальную атмосферу составляла 160 метров. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений полей продольной скорости потока представлены на рисунке 4.

Как можно видеть из представленных результатов, предложенная модель как качественно, так и количественно воспроизводит имеющиеся особенности в поле продольной скорости, что свидетельствует о перспективности ее использования для воспроизведения структуры потока над орографически сложными типами подстилающей поверхности.

**В главе 3 диссертации** описано формирование исходных данных для использования предложенной модели применительно к зоне влияния АЭС Ниньтуан-1. Для решения задачи задания конфигурации рельефа нами на алгоритмическом языке FORTRAN-90 был разработан специальный программный модуль DINHOLM, который по заданной системе изолиний

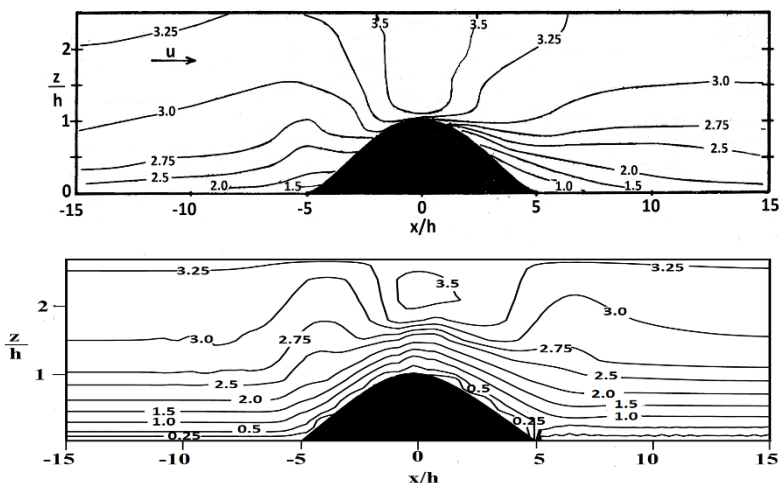


Рисунок - 4 – Сопоставление расчетных (внизу) и экспериментальных (наверху) полей продольной скорости для задачи об обтекании одиночного осесимметричного холма.

рельефа для всей выбранной области расчета реализовывал вычислительную процедуру построения нормалей к такого рода треугольникам из ближайших узлов расчетной сетки, характеристики которых (длина, горизонтальный и вертикальный углы) и представляли уже итоговую цифровую модель рельефа, которая и использовалась при задании граничных условий для компонент скорости ветра, температуры и давления

Для оцифровки рельефа сначала из ресурса “Google map” была получена карта рельефа. Полученная карта с высотными изолиниями далее была преобразована в обменный формат ГИС Arcview (\*.SHP) с соответствующей пространственной привязкой. Пример построения таким способом системы изолиний рельефа с дискретностью 20м по высоте представлен на рисунке 5.

Дополнительно вычерчивалась береговая линия и в узлах регулярной сетки и формировался некоторый «индексный» массив (0 над сушей, – 1 над поверхностью моря). Кроме этого, на основании визуального обследования местности по космическим снимкам карт “Google map”, для территории суши формировалось поле шероховатости подстилающей поверхности, а шероховатость морской поверхности рассчитывалась в зависимости от динамических характеристик приводного слоя по известной формуле Чарнока (Charnock H., 1955).

**В разделе 3.2** подробно описаны особенности задания краевых условий в выбранной области.

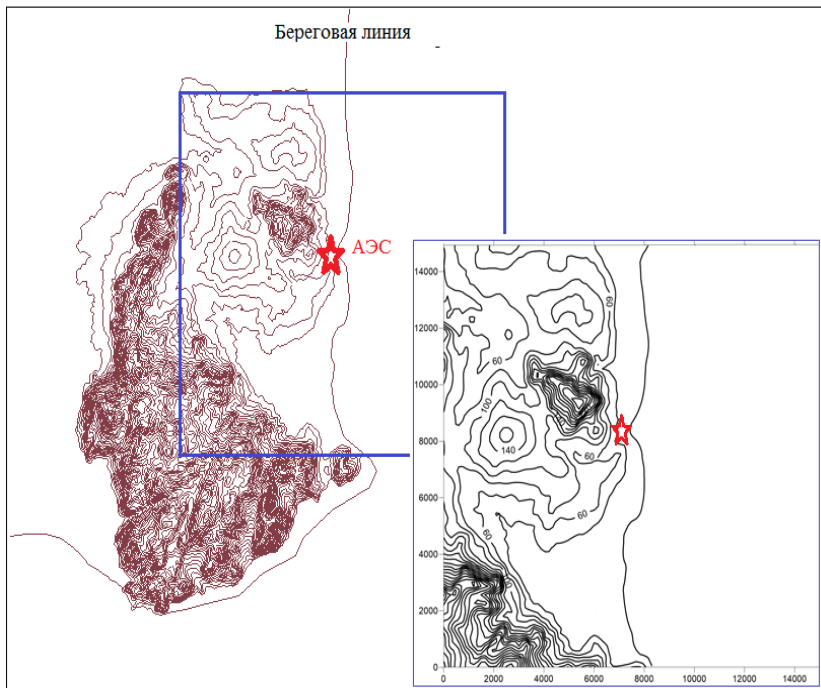


Рисунок -5 – Изолинии рельефа и береговая линия области исследования. На врезке представлена область размером 15x15 кв. км, для которой проводились детальные расчеты.

$X_i, Y_j, I_{i,j}, Z_0(X_i, Y_j)$  Температура водной поверхности для каждого выбранного месяца расчетов полагалась фиксированной и равной среднемесячной температуре по данным наблюдений ближайшей метеостанции (г. Нячанг). По данным этой же метеостанции задавалась среднесуточная температура и амплитуда суточного хода температуры воздуха. Путем выбора амплитуды суточного хода температуры воздуха на каждый час суток рассчитывалась температура воздуха на уровне метеорологической будки (2м), в то время как температура воды задавалась непосредственно на морской поверхности. Оказалось, что средние разности температур «воздух-вода» не столь значительны, как можно было ожидать. Максимальные за год значения этих разностей по абсолютной величине для дневных условий, когда можно ожидать развитие дневного бриза достигаются в апреле,  $^{\circ}\text{C}$  а для ночных – в ноябре.

Для исследования чувствительности модели к учету тех или иных факторов выполнялось две серии тестовых расчетов: для типичных условий и

экстремальных ситуаций. В качестве типичных рассматривался дневные условия в апреле месяце (15 часов местного времени) с расчетом температуры воздуха как суммы среднемесячной температуры воздуха и модального значения амплитуды его суточного хода. В этом случае разность температур «воздух-вода» составила около  $7^{\circ}\text{C}$ . В качестве типичных условий для развития ночного бриза рассматривались ночные условия в ноябре месяце (разность температур – около  $-7^{\circ}\text{C}$ ). В качестве экстремальных рассматривались аналогичные условия, но при выборе максимальных значений амплитуд суточного хода с обеспеченностью 95%. При этом разности температур возрастали по абсолютному значения до  $10-11^{\circ}\text{C}$ . Для всех расчетов ветер на высоте 1500м задавался 4 м/с, северный.

Примеры подобных расчетов для типичных и экстремальных условий для дневного бриза с учетом и без учета рельефа или бриза представлены, соответственно, на рисунках 6 и 7.

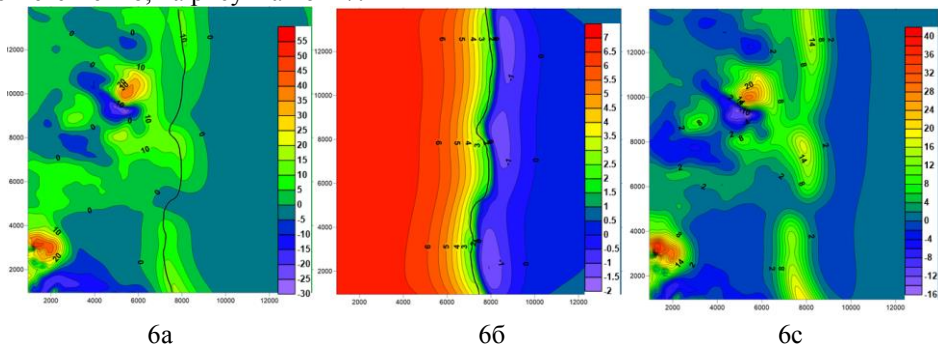


Рисунок-6 – Вертикальные поля по расчетам для типичных условий ветра с учетом влияния: рельефа - 6а; бриза (без рельефа) – 6б; рельефа и бриза – 6в.

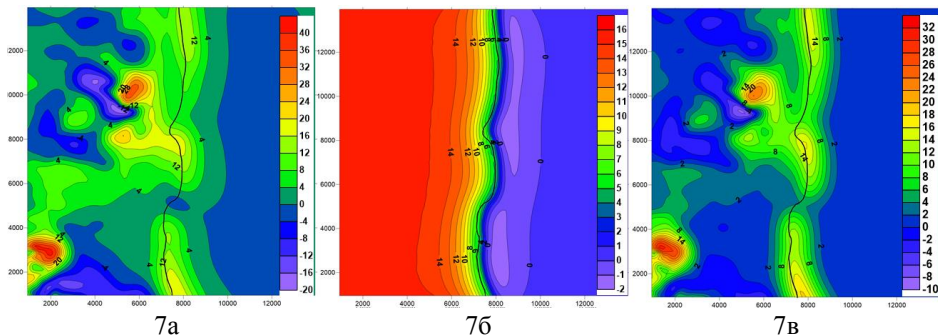


Рисунок-7 – Вертикальные поля по расчетам для экстремальных условий ветра с учетом влияния: рельефа - 7а; бриза (без рельефа) – 7б; рельефа и бриза – 7в.  $^{\circ}\text{C}$

$^{\circ}\text{C}$



Как оказалось, для типичных условий расчетные значения интенсивности вертикальных токов за счет бриза крайне невелики (единицы сантиметров в секунду), в то время как за счет рельефа эти значения достигают 20-30 см/с и особенно значительны над элементами рельефа на высотах 100-400м. Что касается экстремальных ситуаций, интенсивности вертикальных токов только за счет бризовых эффектов возрастают до величин около 15 см/с, причем с учетом рельефа здесь формируется весьма причудливая картина вертикальных скоростей с зонами нисходящих и восходящих движений значительной протяженности.

**В главе 4 диссертации** приводятся результаты расчета статистических характеристик скорости и направления ветра в приземном (приводном) слое, интенсивности вертикальных токов, а также категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, полученные с использованием передаточной функции разработанной модели, смысл которой состоит в способе преобразования известной по данным реанализа статистики скорости  $(V_{850}, R_{850}, S, X)$   $U_{850}$  и направления  $(R_{850})$  ветра на высоте 850гПа, а также повторяемости амплитуд суточного хода  $(A)$  в конкретный сезон  $(S)$  в соответствующие повторяемости скорости ветра  $(U)$ , направления ветра  $(R)$ , вертикальной скорости  $(W)$  и категории устойчивости  $K$  в приземном слое на различном расстоянии от площадки строительства АЭС:

$$(V_{850}, R_{850}, S, X) \Rightarrow \text{Модель} \Rightarrow (U, W, K, R, X)$$

Для подобных расчетов была выполнена серия запусков модели на ПЭВМ с некоторым набором градаций исходных данных, в результате которых был сформирован комплект таблиц (Приложения А –Д диссертации), пример одной из которых приведен в Таблице 1.

В качестве примера подобной расчетной статистики приведем рисунок 8, на котором представлены гистограммы повторяемости скорости и розы ветров приземного (приводного) ветра в точке строительства АЭС и на расстояниях 5км по направлению основных румбов.

**В Заключении** сформулированы основные выводы из проделанной работы.

1. На основе проверки выполнимости для низких широт в окрестности территории Вьетнама соотношения для расчета геострофического ветра по полю давления обоснована принципиальная возможность применения современных методов моделирования АПС применительно к территории Вьетнама севернее 7.5 градусов с.ш.

2. Предложен и реализован в форме программного модуля метод описания рельефа произвольной конфигурации применительно к 3D гидротермодинамическим моделям, а также осуществлена его верификация путем сопоставления результатов моделирования с натурным экспериментом по продувкам упрощенных форм рельефа в аэродинамической трубе.

3. Разработана и реализована на ПЭВМ комбинированная 3D гидротермодинамическая численная модель нижней тропосферы над поверхностью с произвольной конфигурацией рельефа, береговой черты,

температурой воды а также характеристик шероховатости подстилающей поверхности.

Таблица 1 – Категории устойчивости атмосферы в контрольных точках разных направлениях и скоростях на поверхности 850 гПа с учетом влияния рельефа и бриза для 15 часов апреля месяца.

Параметры ветра наверху		Контрольные точки								АЭС
Направление, градус (°)	Скорость, м/с	1	2	3	4	5	6	7	8	
0	2	A	G	G	G	F	A	A	A	A
	4	B	F	F	F	F	B	B	A	B
	6	C	E	E	D	E	C	B	B	C
	8	D	B	B	B	E	D	C	B	D
	10	D	A	A	A	E	D	D	B	D
45	2	D	G	G	G	G	D	D	A	D
	4	D	F	F	F	G	D	A	A	A
	6	A	D	D	D	F	A	A	A	A
	8	A	A	A	A	F	A	A	A	A
	10	A	A	A	A	B	A	A	A	A
90	2	A	G	G	G	G	A	A	A	A
	4	B	F	F	F	F	B	B	B	B
	6	C	F	F	F	F	C	B	B	C
	8	D	E	E	E	F	D	C	C	D
	10	D	E	E	E	F	D	C	C	D
135	2	B	G	G	G	F	B	A	A	B
	4	C	F	F	F	F	C	B	B	C
	6	D	F	F	F	G	D	C	C	D
	8	D	F	F	F	G	D	D	C	D
	10	D	F	E	E	G	D	D	D	D
180	2	A	G	G	G	F	A	A	A	A
	4	B	F	F	F	F	B	B	A	B
	6	C	F	F	F	F	C	B	B	C
	8	D	F	F	F	E	D	C	B	D
	10	D	F	G	F	E	D	D	C	D
225	2	D	G	G	G	G	D	A	A	D
	4	A	F	F	F	G	D	A	A	A
	6	A	F	F	F	G	A	A	A	A
	8	A	F	F	F	F	A	D	A	A
	10	A	F	F	F	F	A	A	A	A
270	2	A	G	G	G	G	A	A	A	A
	4	B	F	F	F	F	B	B	B	B
	6	C	F	F	F	F	C	B	B	C
	8	D	F	F	F	F	D	C	C	D
	10	D	F	F	F	E	D	D	C	D
315	2	B	G	G	G	F	B	A	A	B
	4	C	F	F	F	F	C	B	B	C
	6	D	F	F	F	E	D	C	C	D
	8	D	F	E	E	E	D	D	C	D
	10	D	E	E	E	E	D	D	D	D

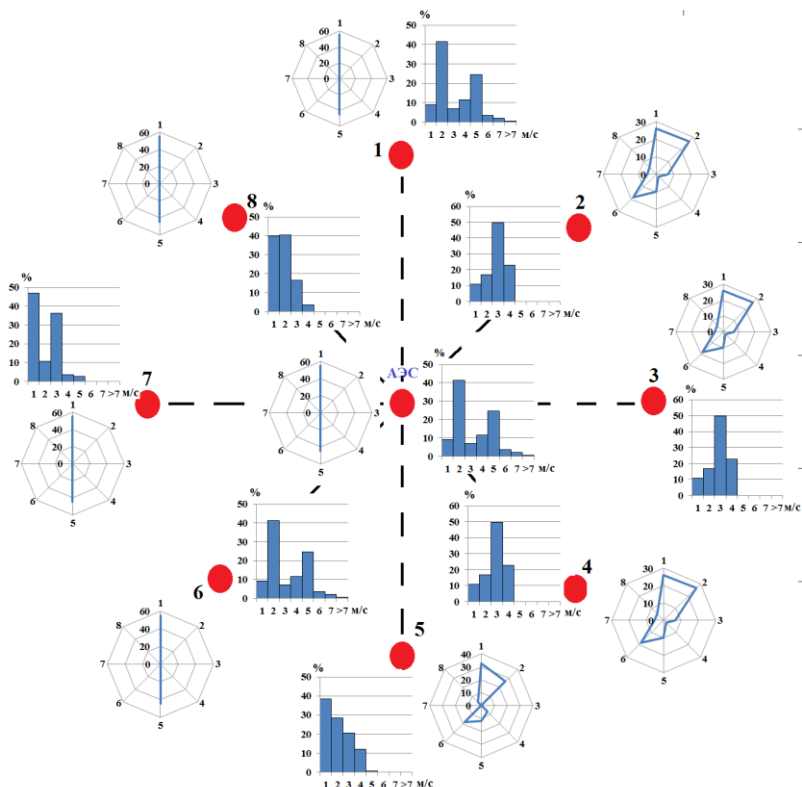


Рисунок 8 – Розы ветра и повторяемость скорости в контрольных точках по расчетам с учетом влияния рельефа и бриза в дневное время весны (апрель).

4. Проведен комплекс численных экспериментов применительно к территории зоны влияния АЭС Ниньтуан-1 для оценки чувствительности результатов расчета характеристик атмосферы, определяющих условия рассеяния радионуклидов, который, в частности, показал, что:

- для типичных ситуаций ожидаемого максимального развития бриза расчетные значения интенсивности вертикальных токов за счет бриза крайне невелики (единицы сантиметров в секунду), в то время как за счет рельефа эти значения достигают 20-30 см/с и особенно значительны над элементами рельефа на высотах 100-400м;

- для экстремальных ситуаций (максимальные значения амплитуды суточного хода температуры) интенсивности вертикальных токов только за счет бризовых эффектов возрастают до величин около 15 см/с, причем с учетом

рельефа здесь формируется весьма причудливая картина вертикальных скоростей с зонами нисходящих и восходящих движений значительной протяженности.

5. Предложен и реализован метод пересчета известных по данным архива реанализа атмосферных процессов статистических характеристик поля ветра на уровне 850гПа в неизвестные статистические характеристики поля ветра, вертикальной скорости и характеристик устойчивости в зоне распространения облака аварийного выброса АЭС, который, в частности, позволил установить, что:

- наиболее существенное влияние рельеф на изучаемой территории оказывает на направление ветра, так что если над водной поверхностью расчетная роза ветров вблизи поверхности носит вполне привычный характер, то над сушей ситуация коренным образом меняется: с небольшими различиями по вероятности наблюдается лишь северный и южный ветер;

- расчетные повторяемости вертикальной скорости на высоте 100м над поверхностью показывают, что их значения над водой варьирует от -5 до 5 см/с, в то время как над сушей изменяются в более широких пределах – от -10 до 10 см/с, лишь с очень небольшими вероятностями (не более 5% случаев) выходя за эти пределы;

- расчетные повторяемости категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда над сушей и водой разительным образом отличаются друг от друга: над водой, как в дневное, так и в ночное время суток доминирует устойчивая стратификация, в то время как над сушей – в дневное время конвекция, а в ночное время – нейтральная стратификация.

### **Публикации соискателя по теме диссертации.**

#### **В изданиях из перечня ВАК:**

1 . М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, Динь Хи Нго. Численное моделирование микромасштабного обтекания рельефа// Ученые записки РГГМУ 2015. Вып. 42. – С. 104–108.

2. Гаврилов А.С, Донг Н.Ф., Хи Н.Д. О возможностях использования геострофического соотношения в тропической зоне// Ученые записки РГГМУ 2016. Вып. 39. – С. 99–108.

3. Гаврилов А.С, Харченко Е.В., Донг Н.Ф., Хи Н.Д. Управление рисками при авариях на атомных электростанциях с использованием математических моделей переноса и рассеяния нуклидов в атмосфере/ Естественные и технические науки, №3, 2015

#### **В прочих изданиях:**

4. Gavrillov A.S., Kharchenko E.V., Ngo D.H., Nguen F.D. Radiation exposure risk assessment for population in case of accidents at NPP using planetary boundary layer model. Материалы IV международной научно-практической конференции; Академическая наука - проблемы и достижения. 7-8.07.2014 г., North Charleston, USA, том 3.