

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Научно-исследовательский вычислительный центр

УДК 551.5

УТВЕРЖДАЮ

Директор НИВЦ МГУ,

д. ф.-м. н., профессор

А. В. Тихонравов

« ____ » _____ 2007 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ
НАД ГИДРОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ТЕРРИТОРИЕЙ**

Государственный контракт № 02.517.11.9011

в рамках ФЦНТП

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы»

Научный руководитель,

Степаненко В. М.

подпись, дата

Москва 2007

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель

подпись, дата

Степаненко В.М.

(раздел(ы) _____)

РЕФЕРАТ

Отчет _17_ с., _4_ ч., _4_ рис., _2_ табл., _11_ источников, _0_ прил.

Ключевые слова: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ГИДРОТЕРМОДИНАМИКА ВОДОЕМОВ, МЕЗОМАСШТАБНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИИ, ВНУТРЕННИЕ ПОГРАНИЧНЫЕ СЛОИ

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1. Численная модель и проверка ее физической адекватности	8
2. Адаптация численной модели к районам Западной Сибири	10
3. Бризовые циркуляции над районами Западной Сибири.....	11
4. Оценка точности методов агрегирования.....	13
Заключение.....	16
Список использованных источников.....	17

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Гидрологическая неоднородность суши – пространственная неоднородность термодинамических и аэродинамических характеристик поверхности суши, вызванная наличием на ней водных объектов.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что на побережьях морей и крупных водоемов развиваются бризовые циркуляции воздуха. Эти циркуляции характеризуются суточной периодичностью и достигают иногда значительной интенсивности (со скоростями ветра до 10 м/с и сменой направления утром и вечером) (Бурман, 1969; Вельтищев, 1988). Бризы играют значительную роль в гидрометеорологическом режиме прибрежных областей. Так, течения в морях, вызванные бризом, создают суточную изменчивость гидрофизических условий экосистем морских побережий. Бризы имеют также немаловажное социально-экономическое значение. Замечено, например, (Eastman ...), что бриз значительно влияет на перенос примесей в атмосферном воздухе (аэрозолей, газовых компонент), в том числе и антропогенного происхождения. В некоторых случаях это неблагоприятно сказывается на качестве воздуха. Кроме того, наличие бризов вдоль побережий повышает ветроэнергетический потенциал этих территорий. Таким образом, очевидно, что прогноз бризов имеет важное практическое значение. Поэтому к настоящему времени создано достаточно много как аналитических (Гутман, 1969; Rotunno, 1983), так и численных гидродинамических моделей бриза (Pielke, 2002). В этих работах, как правило, рассматривается случай бриза, возникающего над одним крупным водоемом (морем, озером). В то же время, на суше часто соседствует друг с другом несколько крупных водоемов (Великие Американские озера), или наблюдается множество мелких и относительно неглубоких озер (гидрологически неоднородные территории). Следует ожидать, что в таком случае будет развиваться сложная картина взаимодействующих мезомасштабных циркуляций. Эти циркуляции представляют своего рода турбулентность, которая производит эффект перемешивания воздушной массы по горизонтали и вертикали. В частности, это имеет значение для переноса примесей. Например, указанный эффект должен играть заметную роль над территорией Западной Сибири, на которой располагаются сотни тысяч озер, и где производится активная добыча нефти с выбросом в атмосферу сопутствующих веществ.

Важно отметить, что сеть наземных метеорологических станций, как правило, слишком редка, чтобы по данным измерений на ней можно было бы идентифицировать наличие бризовых циркуляций над гидрологически неоднородной территорией. В таких условиях численное моделирование становится единственным инструментом изучения указанных процессов. Однако нам неизвестны работы, в которых такое изучение проводилось.

Следует подчеркнуть также роль водоемов и мезомасштабных атмосферных течений над гидрологически неоднородными территориями в моделировании общей циркуляции атмосферы. Как водоемы, так и указанные течения являются подсеточными для крупномасштабных моделей атмосферы, поэтому их эффект на общую циркуляцию атмосферы должен быть учтен

посредством соответствующих параметризаций. В частности, пространственная неоднородность турбулентных потоков в приземном слое учитывается, как правило, методами агрегирования.

Целью настоящей работы является количественная оценка характеристик бризовых циркуляций, возникающих над гидрологически неоднородной территорией.

Научно-техническим заданием, адекватным поставленной в настоящей работе цели, является совместная численная модель «атмосфера-суша-водоем» (Степаненко и др., 2006).

В настоящей НИР поставлены следующие **задачи**:

- проверить способность используемой численной модели реалистично воспроизводить бризовые циркуляции и зависимость их интенсивности от внешних факторов;
- адаптировать численную модель «атмосфера-суша-водоем» к проведению расчетов атмосферной циркуляции над конкретными районами Западной Сибири;
- рассчитать основные характеристики мезомасштабных циркуляций, возникающих над гидрологически неоднородными районами Западной Сибири;
- оценить применимость методов агрегирования турбулентных потоков для гидрологически неоднородной территории.

1. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И ПРОВЕРКА ЕЕ ФИЗИЧЕСКОЙ АДЕКВАТНОСТИ

Очевидно, что взаимодействие водоемов суши с атмосферой может быть достаточно полно воспроизведено только в рамках совместной модели «атмосфера-суша-водоем». В качестве атмосферной компоненты такой модели в настоящей работе используется мезомасштабная модель Nh3d (Miranda, 1990; Miranda and James, 1992), разработанная в университетах городов Рединг и Лиссабон. Выбор данной модели обусловлен тем, что она трехмерна, негидростатична и обладает достаточно хорошим пространственным разрешением (до 2 км).

В качестве компоненты «суша» используется известная двухуровневая модель тепловлагопереноса в почве ISBA (Mahfouf et al., 1995). Как показали численные эксперименты, результаты расчетов по этой модели и по многослойной модели почвы ИВМ РАН на масштабе времени порядка нескольких суток отличаются незначительно, так что она была выбрана для дальнейших расчетов ввиду своей вычислительной простоты.

Для определения способности построенной модели воспроизводить бризовые циркуляции проведена серия численных экспериментов по воспроизведению внутренних пограничных слоев и мезомасштабных циркуляций над водоемами, в которых варьируются свойства подстилающей поверхности суши и синоптические условия. В контрольном эксперименте в центре расчетной области задавалось озеро, форма которого представляет эллипс. Условия этого эксперимента представлены в табл. 1.1. Эксперимент начинался в 6:00 местного времени и продолжался около 70 ч. Процессы конденсации в атмосфере не учитывались (водяной пар считался пассивной примесью), поскольку бризы в природе развиваются преимущественно в безоблачную или малооблачную погоду. Фоновая температурная стратификация задавалась устойчивой с градиентом 2-3 К/км.

Таблица 1.1. Параметры контрольного эксперимента с моделью «атмосфера-суша-водоем»

Параметр	Значение параметра
Размеры озера	144×90 км
j , широта	60 ° с. ш.
Δx , шаг сетки вдоль осей OX и OY	10 км
n_x , количество узлов сетки вдоль осей OX и OY	36
n_s , количество узлов сетки по вертикали	21

Δt , шаг по времени	5 с
Влажность почвы	0.30 м ³ /м ³
Проективное покрытие растительности	50%
Глубина водоема	2 м
Облачность	0 баллов
U_g , скорость геострофического потока	0 м/с

Распределение приземного ветра в этом эксперименте достаточно адекватно отражает основные особенности наблюдаемых в природе дневных бризов (рис. 1.1). В частности, «глубина» проникновения бриза на сушу составляет ~50 км, вертикальная протяженность бризовой ячейки около 2 км, направление ветра отклоняется силой Кориолиса от нормали к берегу, кроме того, над водоемом имеет место устойчиво стратифицированный пограничный слой, а над сушей - конвективный - все эти черты находятся в согласии с данными наблюдений в умеренных широтах (Бурман, 1969; Вельтищев, 1988).

Проведены эксперименты по чувствительности интенсивности бризовой циркуляции к следующим параметрам (в скобках приведены значения, отличающиеся от соответствующих значений в контрольном эксперименте): глубина водоема (10, 100 м), влажность почвы (0.1 м³/м³), проективное покрытие растительности (0%, 100%), скорость геострофического ветра (10 м/с), облачность (10 баллов; облачность задавалась как внешний параметр и использовалась при расчете солнечной суммарной радиации и встречного излучения атмосферы у земной поверхности). Кроме того, проведены эксперименты с различной конфигурацией гидрологической неоднородности (5 и 16 озер) и рассчитан бриз для случая, когда водоем окружен возвышенностью (высота 1 км). Для всех экспериментов наблюдается качественное согласие результатов расчетов и соответствующих закономерностей, наблюдаемых в природе: например, повышенная влажность почвы и повышенный балл облачности приводят в модели к ослаблению бриза; при наличии возвышенности вдоль береговой зоны происходит «сложение» бриза с ветром склонов; сильный фоновый поток подавляет бризовую циркуляцию и др. Наибольшие скорости бриза (до 8 м/с) получены в эксперименте «пустыня», в котором задавались пониженная влажность почвы и отсутствие растительности.

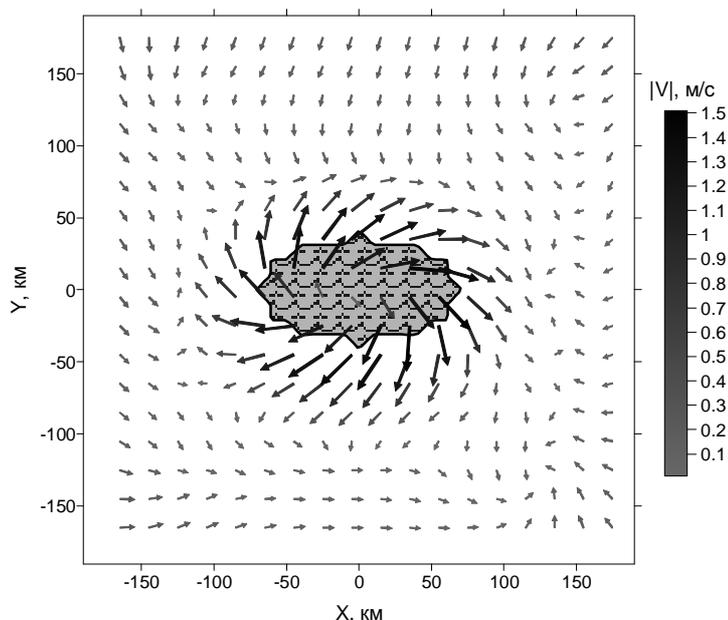


Рис. 1.1. Поле горизонтального ветра на нижней σ -поверхности атмосферной модели (~35 м над земной поверхностью) в 15:00 местного времени первого дня интегрирования в контрольном эксперименте. Заштрихованной областью показано озеро.

Наряду с тем, что во всех экспериментах модель достаточно реалистично воспроизвела интегральные характеристики дневного бриза, ночной бриз в ней практически не проявляется – модельный ветер в это время суток дует почти по касательной к береговой линии, в то время как согласно наблюдениям он направлен почти по нормали к берегу в сторону водоема. Предположительно, небольшой поворот ветра в атмосферной модели ото дня к ночи вызван недостаточным ночным выхолаживанием воздушной массы над сушей в силу отсутствия параметризации длинноволнового излучения.

2. АДАПТАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ К РАЙОНАМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Адаптация используемой в настоящей работе численной модели «атмосфера-суша-водоем» к конкретному району сводится к спецификации распределения по поверхности этого района следующих характеристик:

- 1) абсолютная высота поверхности;
- 2) уровень шероховатости;
- 3) альбедо;
- 4) проективное покрытие растительности;
- 5) доля ячейки, занятая водоемами;
- 6) глубина водоема;
- 7) глубина рассматриваемого слоя почвы;

- 8) влажность почвы в начальный момент времени (на 2-х уровнях);
- 9) температура почвы в начальный момент времени (на 2-х уровнях);
- 10) процентное содержание глины в почве;
- 11) процентное содержание песка в почве;
- 12) тип растительности;
- 13) листовой индекс;
- 14) устьичное сопротивление;
- 15) количество влаги, перехваченное растительностью в начальный момент времени;

Модель было настроена по указанным параметрам к двум районам Западной Сибири. Первый район в сферических координатах представляет собой квадрат, координаты точек которого находятся в пределах (54.5-58.6 ° с.ш., 63.1-66.6 ° в.д.). Второй район также представляет собой квадрат (60.0 – 62.0 ° с.ш., 73.0 – 77.0 ° в.д.), который находится в среднем течении р. Обь, так что на его территории находятся города Сургут, Нижневартовск и Нефтеюганск. В первом случае распределение абсолютных высот и водоемов было получено из баз данных о подстилающей поверхности модели MM5 с разрешением 3.7 км. Во втором случае данные о высотах получены из базы данных DEM (Digital Elevation Model) с тем же разрешением, а распределение водоемов извлечено из данных проекта GLC2000 (Global Land Cover 2000). Все источники находятся в свободном доступе в Интернете. Параметры растительности были настроены на тип растительности «тайга».

3. БРИЗОВЫЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НАД РАЙОНАМИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Поля ветра в приземном слое, полученное в экспериментах для районов Западной Сибири представлено на рис. 3.1 и 3.2. Как видно, над водоемами наблюдается дивергенция поля ветра – признак дневных бризовых течений. Достоверность полученной картины циркуляции может быть проверена в будущем при наличии соответствующих данных измерений. В то же время, необходимо отметить, развитие бризов над водными объектами с размером более 10 км, которые есть и на данной территории, подтверждается наблюдениями (Струнин и Хияма, 2005).

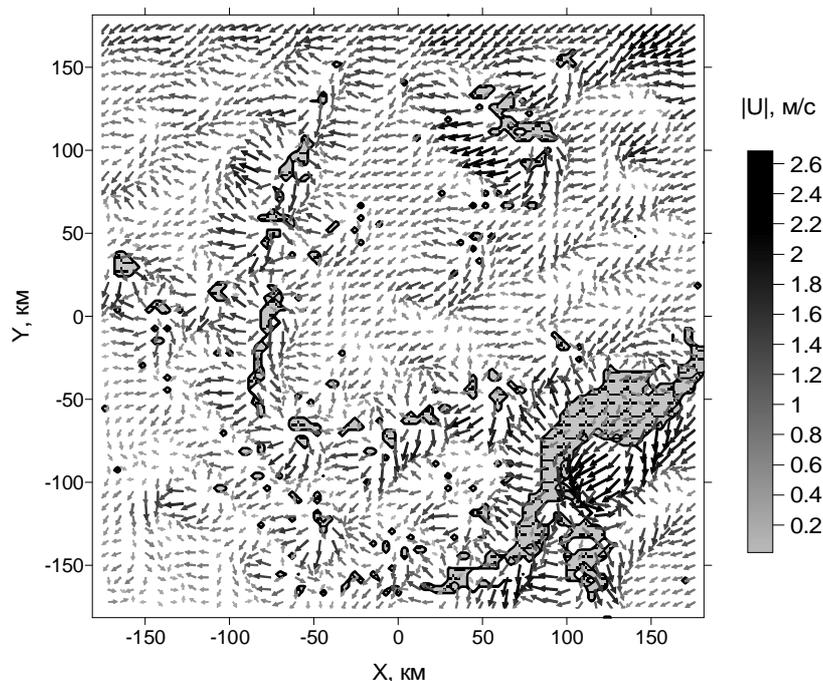


Рис. 3.1. Поле горизонтального ветра на нижней σ -поверхности атмосферной модели (~35 м над земной поверхностью) в 15:00 местного времени первого дня интегрирования в эксперименте с гидрологически неоднородным участком Западной Сибири (54.5-58.6 ° с.ш., 63.1-66.6 ° в.д.). Заштрихованными областями показаны водоемы

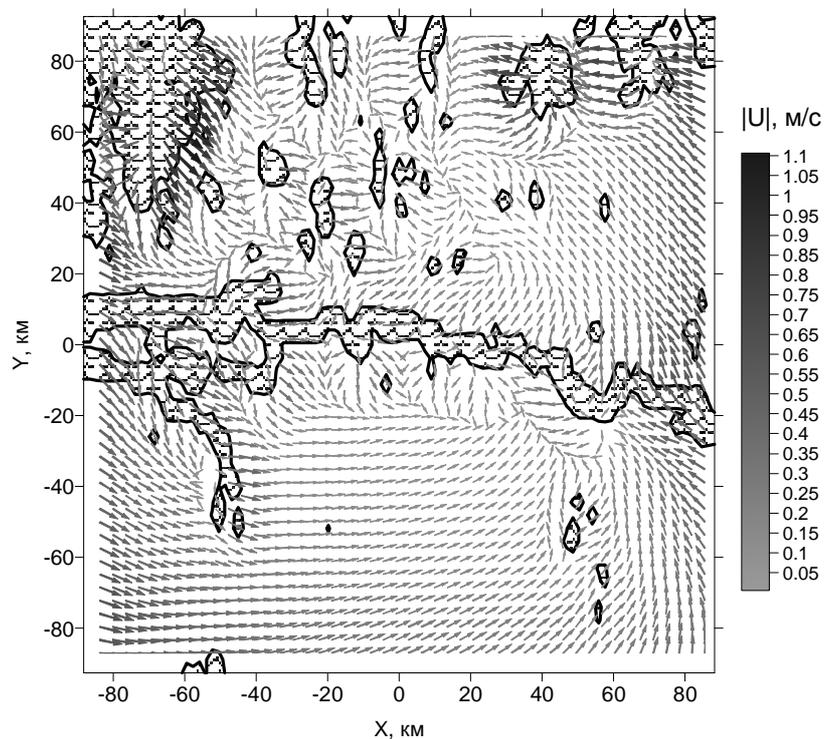


Рис. 3.2. Поле горизонтального ветра на нижней σ -поверхности атмосферной модели (~35 м над земной поверхностью) в 12:00 местного времени первого дня интегрирования в эксперименте с гидрологически неоднородным участком Западной Сибири (60.0 – 62.0 ° с.ш., 73.0 – 77.0 ° в.д.). Заштрихованными областями показаны водоемы

4. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ АГРЕГИРОВАНИЯ

Как указывалось во введении, эффект подсеточных для атмосферной модели водных объектов необходимо учитывать с помощью методов агрегирования. Наиболее распространенными в мировой практике методами агрегирования являются метод эффективных параметров и мозаичный метод (Koster and Suarez, 1992). Метод эффективных параметров не подходит для гидрологически неоднородной территории, поскольку в этом случае невозможно определить фигурирующий в нем «средний» тип подстилающей поверхности. Оценка же точности мозаичного метода для такой территории, насколько известно автору, в предыдущих работах не производилась.

Предложена следующая методика оценки точности мозаичного метода. В численном эксперименте с моделью «атмосфера-суша-водоем» рассчитываются средние по области моделирования потоки явного и скрытого тепла (\bar{H} и \bar{LE} , соответственно), которые принимаются за «истину». Средние по области значения метеовеличин в приземном слое используются в качестве входных данных для диагностических расчетов по моделям суши (одна вертикальная колонка) и водоема (одна вертикальная колонка). Рассчитанные в диагностическом режиме потоки над сушей и водоемом агрегируются по мозаичному методу:

$$(\bar{H}^{\text{моз}}, \bar{LE}^{\text{моз}}) = (1 - a_w)(H_s, LE_s) + a_w(H_w, LE_w),$$

где a_w – доля площади, занятая водоемами, нижний индекс s означает поток над сушей, а w – поток над водоемами.

Расхождение агрегированных и «истинных» средних потоков оценивалось с помощью средних по времени значений отдельно за ночные и дневные сроки (обозначенных сверху «крышкой»), среднеквадратических отклонений временных рядов \hat{S} и коэффициентов вариации \hat{r} (относительных ошибок мозаичного метода). Эти величины для дневного времени суток приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Средние и агрегированные за дневное время
турбулентные потоки

Название эксперимента	Поток явного тепла, Вт/м ²				Поток скрытого тепла, Вт/м ²			
	$\hat{H}\%$	\hat{H}	$\hat{\sigma}_H$	\hat{f}_H , %	$\hat{LE}\%$	\hat{LE}	$\hat{\sigma}_{LE}$	\hat{f}_{LE} , %
Контрольный	13.58	14.85	1.70	11	165.88	167.22	7.38	4
Глубина озера 1 м	13.62	14.86	1.66	11	165.84	167.28	7.45	4
Глубина озера 10 м	13.64	14.87	1.64	11	165.76	167.35	7.52	4
Проективное покрытие растительности 0%	25.17	26.42	2.06	8	227.04	231.81	9.49	4
Влажность почвы 10%	66.78	67.74	3.67	5	6.61	6.91	0.98	14
«Пустыня»	198.51	200.79	9.94	5	10.83	11.70	2.84	24
Облачность 10 баллов	0.14	0.63	0.73	115	60.33	53.41	13.27	25
Геострофический ветер 10 м/с	4.07	5.48	2.05	37	226.59	226.4	5.63	2
5 озер	7.73	11.49	4.87	42	139.55	136.92	11.68	8
16 озер	7.83	9.32	1.81	19	131.48	130.75	7.58	6
Участок Западной Сибири	13.85	13.75	1.19	9	169.54	178.59	12.89	7

Аналогичные расчеты проведены для ночного времени суток. Значения потоков, вследствие устойчивости ночной стратификации, оказались значительно меньше дневных (в большинстве экспериментов их модуль не превышал 2-3 Вт/м²). По результатам верификации мозаичного метода сделаны следующие выводы:

- в большинстве случаев (особенно для потока явного тепла) мозаичный метод занижает абсолютные значения средних потоков, что связано с увеличением реальных турбулентных потоков за счет мезомасштабных циркуляций;
- относительная ошибка расчета турбулентных потоков мозаичным методом зависит от абсолютной величины этих потоков (рис. 4.1);

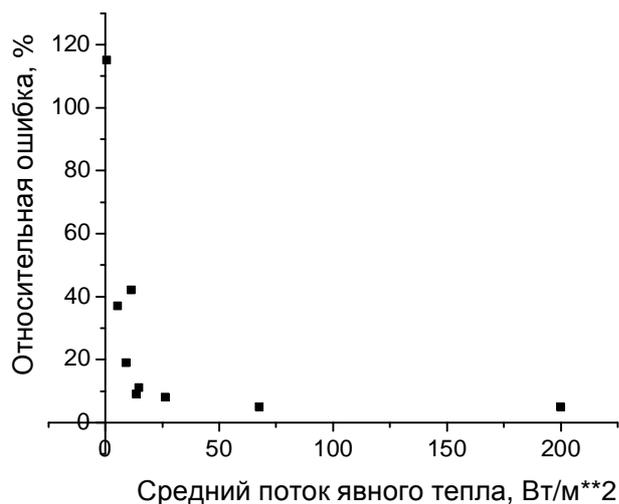


Рис. 4.1. Зависимость относительной ошибки расчета среднего потока явного тепла мозаичным методом от среднего потока явного тепла (за дневное время). Каждому эксперименту соответствует одна точка

- при достаточно высоких значениях средних потоков явного и скрытого тепла (ориентировочно, более 15 Вт/м²) мозаичный метод обеспечивает ошибку их воспроизведения не более 10%;
- мозаичный метод адекватно воспроизводит порядок величины ночных средних потоков;
- ошибка мозаичного метода существенно нелинейно зависит от характеристик подстилающей поверхности и от фоновых метеорологических условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведения НИР получились следующие:

- показано, что численная модель «атмосфера-суша-водоем» способна достаточно адекватно воспроизводить дневные бризовые циркуляции;
- модель адаптирована для двух районов Западной Сибири;
- для этих двух районов рассчитаны бризовые циркуляции, характеристики которых близки к типичным значениям, наблюдаемым в природе;
- показано, что мозаичный метод агрегирования потоков для случая гидрологически неоднородной территории характеризуется приемлемой ошибкой воспроизведения реальных средних потоков (менее 10%).

Поставленные задачи выполнены, хотя некоторые результаты требуют дальнейшего подтверждения на независимом эмпирическом материале. В первую очередь это касается характеристик бризовых циркуляций, полученных в экспериментах с численной моделью. Саму численную модель также необходимо усовершенствовать путем добавления параметризаций некоторых физических процессов, в первую очередь, переноса радиации.

Результаты НИР могут иметь различные приложения. Например, оценка ошибки мозаичного метода агрегирования может оказаться полезной при решении проблем описания взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью в численных моделях. Кроме того, модель «атмосфера-суша-водоем» имеет достаточно простую структуру, поэтому может оказаться полезной в образовательном процессе по гидрометеорологическим специальностям в высших учебных заведениях.

Высокий уровень представленной НИР обусловлен новизной постановки задачи (см. введение), а также научным уровнем используемой вычислительной технологии «атмосфера-суша-водоем». В частности, используемый в этой модели блок термодинамики водоемов находится на уровне лучших мировых аналогов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А. Бурман. Местные ветры. – Л.: Гидрометеиздат. – 341 с.
2. Н. Ф. Вельтищев. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. – Сб. лекций, Женева, 1988. – 136 с.
3. Л. Н. Гутман. Введение в нелинейную теорию мезометеорологических процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 285 с.
4. Rotunno R. On the linear theory of the land and sea breeze. *J. Atmos. Sci.*, 1983, Vol. 40, No. 8. pp. 1999–2009.
5. R. A. Pielke. *Mesoscale Numerical modeling*, 2d edition, Academic Press, San Diego, CA., 2002, 676 pp.
6. В. М. Степаненко, П. М. Миранда, В. Н. Лыкосов. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши. *Вычислительные технологии*, т. 11, ч. 3, 2006, с. 118-127.
7. P. M. Miranda. *Gravity waves and wave drag in flow past three-dimensional isolated mountains*. Phd Thesis, University of Reading, 1990, 191 pp.
8. P. M. A. Miranda, and I. N. James. Non-linear three-dimensional effects on gravity wave drag: Splitting flow and breaking waves. *Quart. J. R. Met. Soc.*, Vol. 118, 1992, pp. 1057-1082.
9. J. F. Mahfouf, A. O. Manzi, J. Noilhan, H. Giordani, and M. Deque. The land surface scheme ISBA within the Meteo-France Climate Model ARPEGE. P.1: Implementation and preliminary results. *J. of Climate*, Vol. 8, 1995, pp. 2039-2057.
10. М. А. Струнин, Т. Хияма. Самолетные исследования атмосферного пограничного слоя над долиной реки Лены. – *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2005, т. 41, №2, с. 178-200.
11. R. D. Koster and M. J. Suarez. A comparative analysis of two land surface heterogeneity representations. *J. Climate*, Vol. 5, 1992, pp. 1379-1390.