

## РАЗВИТИЕ КОМПОНЕНТОВ СОВМЕСТНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КЛИМАТА СИБИРИ

В. И. Кузин, В. Н. Крупчатников, Е. Н. Голубева, Г. А. Платов,  
В. В. Малахова, А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, А. А. Фоменко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия

---

УДК 551.588:519.63

Изменения климата, обусловленные естественными и антропогенными факторами, являются результатом сложных нелинейных взаимодействий физических, химических и биологических процессов в атмосфере, океане и Земле. Так как исследование климатической системы представляет собой поиск объяснения поведения климата на период от года до столетий, основное внимание уделяется изучению механизмов взаимодействия между указанными подсистемами климатической системы. Настоящая работа посвящена описанию опыта создания компонентов модели климатической системы для исследования глобального климата и климата Сибири. Представлены результаты, полученные в последнее время в этом направлении в лаборатории математического моделирования процессов атмосферы и гидросферы Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

**Ключевые слова:** климатическая система, динамика атмосферы и океана, численное моделирование, речной сток, растворенный метан.

The climate variations caused by natural and anthropogenic factors are the result of the complex nonlinear interaction in physical, chemical and biological processes in the Atmosphere, Ocean and on the Earth. The investigation of the climate system represents the Search for explanation of the climate behavior on the time-scale from interannual to centennial. The main attention is paid to the examination of the interaction mechanisms between pointed subsystems in the global climate system. The paper is devoted to the description of the experience in the development of the components of the climatic system for the investigation of the global climate and the regional Siberian climate. This work is based on the results obtained in the Laboratory of Mathematical Modelling of the Processes in the Atmosphere and Hydrosphere, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics.

**Key words:** Climatic system, atmospheric and oceanic dynamics, numerical modeling, river discharge, dissolved methane.

**Введение.** Задача оценки влияния изменений климата на развитие биосферы и человеческого сообщества в целом является одной из основных задач современной науки. Важность реше-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-05-01075, 13-05-00480), Интеграционных программ СО РАН № 109, РАН № 23.3-1, Отделения математических наук РАН № 1.3.3-6.

ния этой проблемы определяется необходимостью выбора стратегии дальнейшего развития общества для предотвращения климатических и экологических катастроф.

Из существенных региональных проявлений глобальных изменений климата в Сибири можно выделить следующие:

- изменение циркуляции и ледового покрова Северного Ледовитого океана и изменение в связи с этим климата Арктики и Сибири;
- трансформацию гидрологического цикла в регионе, включающую изменение стока великих Сибирских рек и режима болот;
- изменение зон вечной мерзлоты и, как следствие, изменение ландшафтных зон;
- повышение уровня океана и связанные с этим возможные катастрофические последствия для региона.

Исследования, проводимые в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, инициированные академиком Гурием Ивановичем Марчуком и поддерживаемые впоследствии акад. Анатолием Семеновичем Алексеевым, направлены на изучение климатических изменений глобального и регионального масштабов, которые могут произойти в Сибири. В институте имеется большой опыт решения сложных задач геофизической гидродинамики, к которым относятся проблемы изучения изменения климата Земли. Разработаны численные модели циркуляции атмосферы и океана, а также методы верификации моделей и усвоения данных наблюдений, адекватно описывающие сложную нелинейную динамику атмосферных и океанических процессов.

Основные цели исследований можно сформулировать в виде двух задач:

- 1) определение и оценка региональных проявлений глобальных изменений климата в Сибирском регионе;
- 2) выделение и оценка возможного влияния региональных особенностей на глобальный климат.

Проводимые исследования базируются на математических моделях, включающих модель циркуляции атмосферы, океана и суши, модели пограничных слоев, модели переноса и трансформации примесей в атмосфере и океане, а также класс моделей, дающих оценку влияния климатических изменений на различные компоненты экологической обстановки Сибирского региона.

В настоящее время в мировой практике используется достаточно широкий класс совместных климатических моделей. Наиболее известные из них: модель Национального центра атмосферных исследований США [1], модель Макс-Планк института метеорологии Гамбургского университета [2], модель CNRM-CM5 [3], модель Института вычислительной математики РАН [4].

Глобальные модели общей циркуляции используются для моделирования климата, исследования влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, изучения обратного влияния на атмосферу подстилающей поверхности, покрытой льдами, растительностью и т. п. Тем не менее, существует ряд ограничений применимости данных моделей, обусловленных недостаточностью разрешения региональных особенностей. Одним из подходов, позволяющих разрешить эти трудности, является моделирование региональ-

ного климата. Пространственное разрешение в региональных моделях климата увеличивается так, чтобы можно было описать явления, обусловленные детальными особенностями подстилающей поверхности региона. На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные численного моделирования общей циркуляции атмосферы. Идея регионального моделирования получила развитие [5] и нашла применение при исследовании регионального климата Европы [6] и Арктического региона [7].

**1. Основные компоненты модели климатической системы.** Изменения климата, обусловленные естественными процессами или антропогенным влиянием, являются результатом сложных нелинейных взаимодействий физических, химических и биологических процессов в атмосфере, океане и на поверхности суши. Так как исследование климатической системы представляет собой поиск объяснения поведения климата на период от года до столетий, основное внимание в настоящее время уделяется изучению механизмов взаимодействия между физическими, химическими и биологическими подсистемами.

*Модель атмосферы.* В настоящее время в этом направлении проведена работа по созданию глобальной совместной модели на базе модели атмосферы Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (ИВМиМГ) EsSib и модели биосферы поверхности Земли ИВМиМГ СО РАН. При этом большое внимание уделяется параметризации физических процессов подсеточных масштабов на поверхности Земли и в почве [8].

*Модели океана* занимают одно из ключевых мест в создании базовой модели климата. Океан является важным фактором, влияющим на изменение климата Земли на временных масштабах более года. Так, межгодовая изменчивость, проявляющаяся в возникновении явления Эль-Ниньо, существенно зависит от волновых процессов тропического океана. Периоды взаимодействий порядка десятилетий и столетий связаны с изменениями в термодинамической структуре Мирового океана.

Океан также является одним из основных регуляторов парниковых газов, так как наличие гидрофизических и биохимических процессов делает его как источником, так и стоком. Вследствие этого необходима разработка моделей переноса и трансформации метана, а также моделей углеродного цикла и моделей распространения биогенных элементов в океане.

*Модели морского льда.* Морской лед – важная часть климатической системы. Вынос льда в низкие широты играет основную роль в цикле формирования донных вод на севере и юге Атлантики. Кроме того, сценарные эксперименты по изучению отклика климатической системы на увеличение  $\text{CO}_2$  показывают существенное потепление в полярных районах. Связанные с этим изменения процессов льдообразования и изменение гидрологического цикла требуют детального изучения.

*Модели биосферы поверхности Земли* являются существенными компонентами климатической системы. В настоящее время известны модели обмена между атмосферой и поверхностью Земли [9–11]. Модели поверхности Земли передают в модель общей циркуляции атмосферы приземные потоки скрытого и явного тепла, момента, коротковолновой и инфракрасной радиации. Потоки  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  у поверхности Земли являются составной частью глобального цикла этих газов и, следовательно, частью климатической системы.

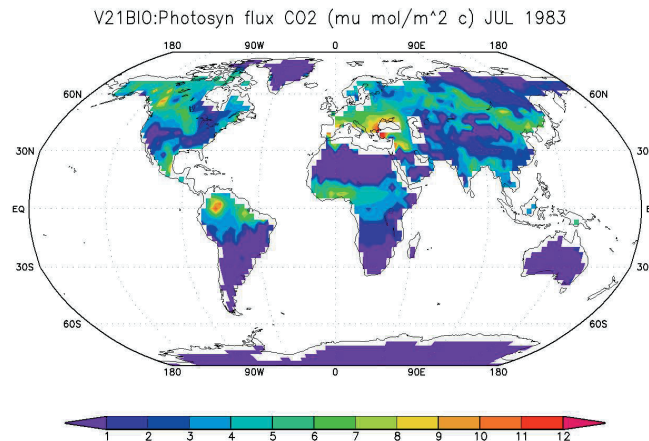


Рис. 1. Поток  $\text{CO}_2$  на поверхности земли. Фотосинтез. Июль 1982

*Организация модели климатической системы (МКС).* МКС представляет собой систему, состоящую из отдельных компонентов, взаимодействующих между собой с помощью специального программного блока – интегратора совместной модели.

## 2. Моделирование компонентов климатической системы.

### 2.1. Глобальная модель атмосферы.

Основные черты и характерные компоненты модели ESSib [15] состоят в следующем:

- полные нелинейные уравнения термодинамики атмосферы;
- обобщенная вертикальная система координат;
- планетарный пограничный слой;
- конечно-разностная аппроксимация системы уравнений, обеспечивающая выполнение законов сохранения;
- полууравновешенная схема интегрирования по времени;
- полулагранжева схема переноса пассивных субстанций;
- крупномасштабная конденсация, определяющая осадки;
- конвекция.

2.2. *Моделирование потоков парниковых газов из биосферы Земли.* Биосферные модели используются для оценки влияния климатических изменений на экологические системы и обратно. Глобальную систему растительного покрова можно разделить на ряд структурных типов, называемых биомами. Глобальная система биомов, вместе с атмосферой и океаном, является одной из важнейших и активных составляющих климатической системы. Поэтому важно моделировать потоки  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , чтобы понять их влияние на парниковый эффект в атмосфере. Кроме явного влияния на цикл парниковых газов, существует не менее важное влияние биохимических процессов на гидрологический цикл.

Модель представляет собой объединение модели процессов на поверхности с учетом растительного покрова и биохимической модели, которая моделирует потоки  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  внутри некоторого биома.

**Газообмен  $\text{CO}_2$**  между листьями и атмосферой возникает в результате процессов фотосинтеза и дыхания. На рис. 1 представлены среднемесячные потоки  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{ моль}/\text{м}^2\text{ сек}$ ), получен-

ные в совместной модели за счет фотосинтеза в июле 1981–1982 гг. Рисунок показывает, как происходит развитие растительности континентов северного полушария летом.

Эксперименты показали возможность успешного моделирования потоков  $\text{CO}_2$  на поверхности земли с учетом суточных и сезонных колебаний. Для того чтобы моделировать на сроки до нескольких столетий и более, необходимо включать блок динамики биомов с учетом биохимических потоков внутри и между биомами.

**Метан ( $\text{CH}_4$ )** является третьим по важности атмосферным компонентом, влияющим на процессы парникового эффекта, после водяного пара и двуокиси углерода. Систематические глобальные наблюдения атмосферного метана показали, что осредненная по Земному шару концентрация метана в течение периода с 1983 по 1992 гг. увеличивалась на 0,8 % в год [12].

На основе трехмерной транспортной модели, разработанной в лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере ИВМиМГ СО РАН [13], данных о концентрации метана на наземной сети станций [12] и крупномасштабных полей радикала  $\text{OH}$  [14], являющегося окислителем метана, проведено моделирование глобального распределения и сезонной изменчивости концентрации  $\text{CH}_4$ .

Моделирование глобального распределения метана в атмосфере показало, что характерной особенностью распределения метана является широтный градиент, направленный с севера на юг, с максимальными концентрациями метана в северном полушарии. Существование планетарного градиента служит доказательством того, что северные торфоболотные системы являются одним из самых существенных естественных источников атмосферного метана. В северо-восточных районах России, относящихся к Арктике, концентрация метана значительно выше глобальной среднегодовой. Предположительно, это является следствием действия газогидратов. Значительные широтные градиенты проявляются в северных и южных тропиках, они определяются границами внутритропической зоны конвергенции.

Сезонный цикл в модели для северного полушария проявляется в двойном осенне-зимнем максимуме. Двойной максимум в сезонных колебаниях метана обусловлен с одной стороны увеличением эмиссии осенью, с другой – уменьшением стока в течение зимы в результате окисления.

*2.4. Моделирование регионального климата Сибири.* Региональная модель атмосферы является составной частью глобальной климатической модели ECSib, разработанной в лаборатории математического моделирования процессов атмосферы и гидросферы ИВМиМГ СО РАН [15]. Результаты математического моделирования климата на основе глобальной модели позволяют получить в целом качественно верную картину распределения основных атмосферных характеристик. Однако горизонтальное пространственное разрешение в глобальной модели не позволяет изучать детально тонкую структуру региональных особенностей. В связи с этим была разработана региональная модель динамики атмосферы, имеющая повышенное пространственное разрешение  $1/3$  градуса. В целом математическая реализация региональной модели не отличается от глобальной. Специфика заключается в необходимости постановки граничных условий на боковых границах, обеспечивающих взаимодействие с глобальной моделью. В качестве боковых граничных условий задаются значения эволюционных переменных на границах области, полученные из глобальной модели. В модели деятельного слоя почвы учитываются растительный покров, наличие снега на поверхности суши, а также процессы в верхнем почвенном слое [16].

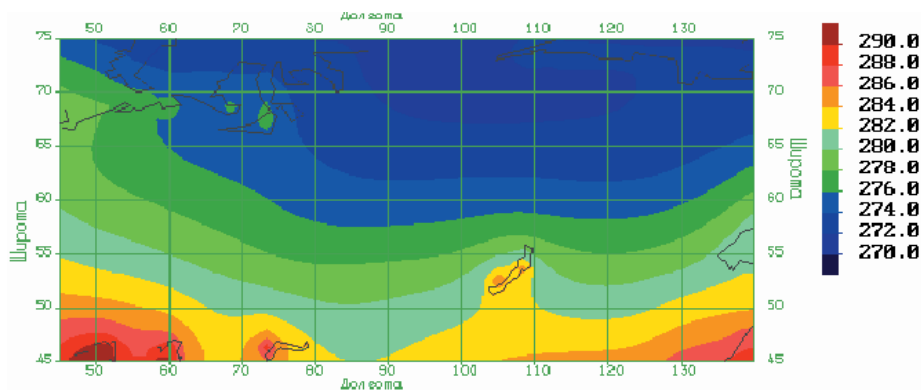


Рис. 2. Среднефевральское распределение приземной температуры (град. К), рассчитанное по региональной модели. Выделяются острова тепла над водной поверхностью (Байкал, Балхаш, Арал)

Эксперимент по исследованию чувствительности модели региональной атмосферы к увеличению разрешения и новой схеме параметризации взаимодействия с подстилающей поверхностью проводился таким образом, что вначале было получено квазиравновесное климатическое состояние атмосферы на основе 10-летнего интегрирования глобальной модели.

На основе полученного состояния в последний год интегрирования расчет по региональной модели проводился совместно с глобальной моделью. Пространственное распределение рассчитанных характеристик, таких как приземная температура и давление, осадки, показывает, что увеличение пространственного разрешения и использование усовершенствованной параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью позволяют получить более детальную картину, в которой проявляются региональные особенности. В частности, в региональной модели хорошо выражены острова тепла над водной поверхностью в зимние месяцы (оз. Байкал, Балхаш, Арал – рис. 2), чего не наблюдается в глобальной модели. Это сказалось на приземном давлении, которое уменьшилось над областями, в которых расположены водные бассейны регионального масштаба.

В летние месяцы картина полностью меняется, поскольку практически исчезает контраст между температурами водной поверхности и суши. При этом разница в воспроизведении приземного давления обусловлена в основном динамическими факторами. Использование региональной модели позволило получить более тонкую структуру распределения осадков, влажности почвы, явных и скрытых потоков тепла на поверхности, чего невозможно достичь с помощью глобальной модели. Это, в свою очередь, отражается на динамических характеристиках вблизи поверхности, демонстрирующих возникновение мезомасштабных циркуляций [17].

**3. Моделирование климата Мирового океана и его частей.** Моделирование термодинамических процессов в Мировом океане является необходимым компонентом исследования климата. Региональная направленность исследований позволила выделить в качестве бассейнов, требующих особого внимания, тропики и северную часть Тихого океана, Арктический океан и Северную Атлантику. Каждая из моделей может являться составной частью общей совместной климатической модели, что позволяет исследовать особенности взаимодействия таких климатических компонентов, как тропики Тихого океана и глобальная атмосфера, Арктический океан и региональные элементы циркуляции атмосферы Северной Евразии.

Основные особенности моделей динамики океана, разработанных в лаборатории математического моделирования процессов атмосферы и гидросферы ИВМиМГ СО РАН, описаны в работах [18–22]:

- полная нелинейная система гидротермодинамики океана;
- учет процессов в верхнем квазиоднородном слое;
- учет формирования и таяния льда на основе подключения численной модели CICE-3.11 ([oceans11.lanl.gov/trac/CICE](http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE));
- использование сдвинутых сеток по пространственным переменным;
- естественные и приведенные системы координат по вертикали;
- использование неявных и полунеявных алгоритмов при аппроксимации по времени;
- разделение баротропной и бароклинной составляющих движения;
- расщепление уравнений по физическим процессам;
- конечно-элементная и конечно-разностная дискретизация по пространству с сохранением основных интегральных инвариантов;
- покоординатное расщепление.

3.1. *Моделирование Циркуляции Мирового океана.* На основе численного моделирования с использованием климатического распределения вынуждающих сил на поверхности океана [23–25] восстановлена структура глобальной циркуляции вод на 1000-летнем периоде [22]. Численная модель Мирового океана воспроизводит основные черты ветровой и термохалинной глобальной крупномасштабной циркуляции вод. В ходе численных экспериментов исследуется чувствительность глобальной циркуляции к присутствию температурно-соленостных аномалий на поверхности океана на временных интервалах столетнего периода. Проведенные численные эксперименты показали: несмотря на то что интенсивность и изменчивость глобальной меридиональной циркуляции океана могут зависеть от термохалинных условий на поверхности океана в полярных районах Северной Атлантики, общая картина "глобального конвейера" остается устойчивой. Показано, что распреснение вод субполярного круговорота приводит к сокращению интенсивности образования Северо-Атлантической глубинной воды, что сопровождается замедлением межконтинентального обмена вод. Наоборот, аномалии температуры и солености, возникающие на поверхности и способствующие повышению конвективной активности вод Северной Атлантики, усиливают глобальный обмен вод Мирового океана. Один из наиболее важных выводов, сделанных в ходе анализа проведенных экспериментов, заключается в следующем: повышение интенсивности меридиональной циркуляции вод бассейна сопровождается интенсификацией горизонтального обращения вод в субтропических циркуляционных системах.

3.2. *Моделирование циркуляционных процессов Тихого океана.* Тихий океан – важный компонент климатической системы, влияющий не только на прилегающие районы Америки и Азии, но и на общую климатическую картину. С тропиками Тихого океана связан один из наиболее сильных сигналов межгодовой климатической изменчивости Эль-Ниньо – Южная Осцилляция (ЭНЮО). С ним связаны разрушительные атмосферные последствия: ливни, наводнения, засухи.

При моделировании процессов, связанных с явлением Эль-Ниньо и межгодовой климатической изменчивостью в Тихоокеанском регионе, особое внимание уделяется качеству численных моделей циркуляции океана [26, 27].

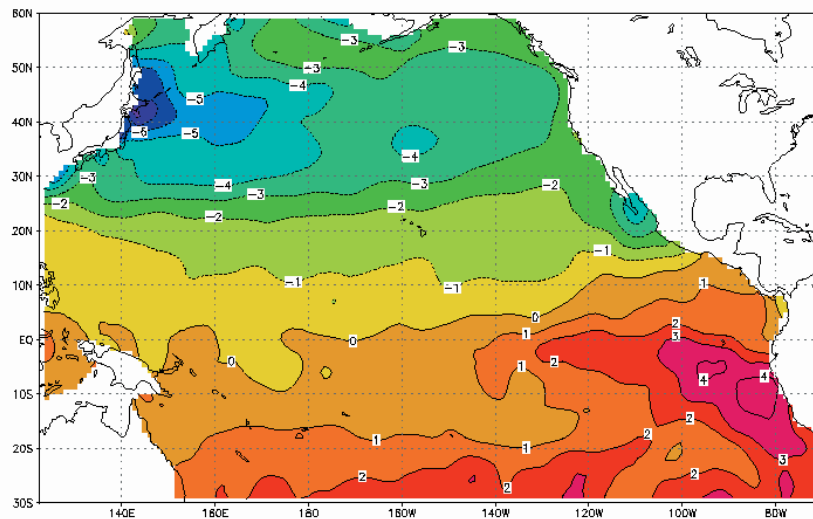


Рис. 3. Рассчитанная по модели аномалия температуры поверхности Тихого океана.  
Декабрь 1982 г.

Для исследования климата Тихого океана и его изменчивости в ИВМиМГ СО РАН разработана трехмерная модель циркуляции северной части Тихого океана, включающая тропическую зону [28].

На основе модели проведены диагностические и короткопериодные прогностические расчеты по определению климатической циркуляции Тихого океана. Изучение изменчивости климата, связанной с процессами в Тихом океане, требует от моделей корректного описания волновой тропической динамики и циркуляции во внетропических зонах. При проведении эксперимента использовались данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в период Эль-Ниньо 1982 г. в океане под влиянием атмосферных воздействий в экваториальной зоне формируется теплая температурная аномалия. Аномалия переносится волновыми процессами на уровне термоклина к восточной периферии Тихого океана, достигая поверхностных слоев в ноябре–декабре 1982 г. (рис. 3), формируя значения температурных аномалий, достигающих пяти градусов, что соответствует данным наблюдений максимальной фазы Эль-Ниньо. Холодная фаза Ля-Нинья 1984 г., воспроизведенная моделью, совпадает с данными наблюдений по амплитуде и фазе.

*3.3. Моделирование климата Северного Ледовитого океана.* Совместная численная модель "океан – лед", основными компонентами которой являются разработанная в ИВМиМГ СО РАН крупномасштабная модель океанической циркуляции [20, 21] и модель морского льда CICE-3.11 (The Los Alamos Sea Ice Model, oceans.llnl.gov/trac/CICE), использовалась для моделирования климатических изменений, происходящих в Северном Ледовитом океане (СЛО) и Северной Атлантике в последние десятилетия. Численный эксперимент, проведенный с использованием банка данных реанализа NCEP/NCAR [29] состояния нижней атмосферы, радиационных потоков и осадков за период с 1948 г. по настоящее время, показал, что происходящие в океане климатические изменения вызваны вариациями атмосферной динамики. Анализ результатов численного эксперимента [30] подтвердил ряд гипотез, разработанных исследователями на основе анализа данных наблюдений.

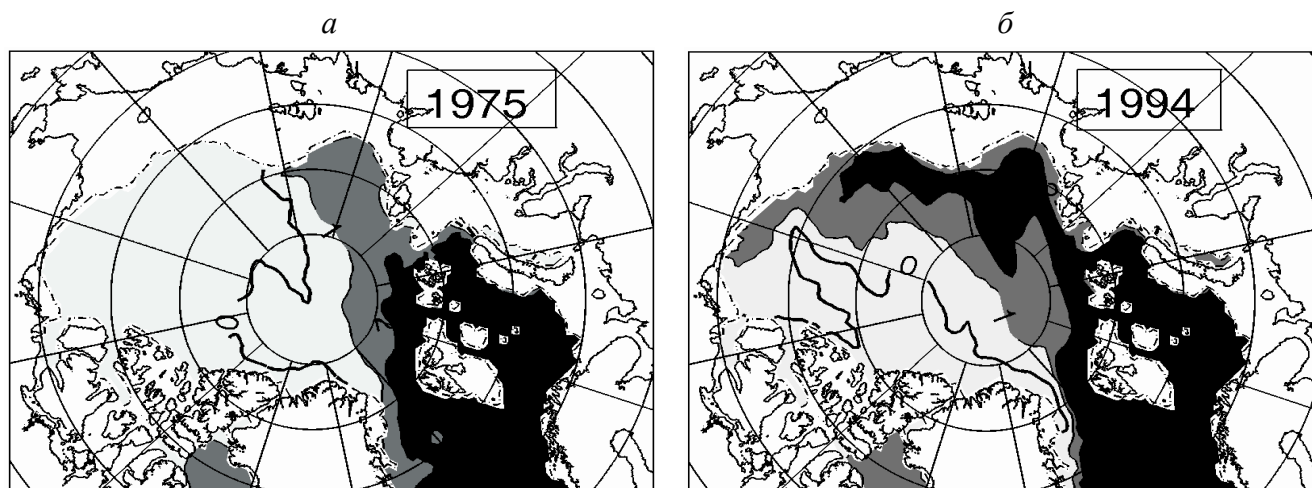


Рис. 4. Изменение поля температуры на глубине 200 м в СЛО в 1974 г. (а). В конце 1980-х годов тепловой сигнал, прошедший через пролив Фрама и Баренцево море, распространился вдоль материкового склона, что привело к повышению температуры атлантического слоя в 1994 г. (б)

Результаты численного моделирования подтверждают существование двух основных типов циркуляции ледового покрова: циклонического и антициклонического, что в значительной степени определяется состоянием атмосферы полярных широт и типом атмосферной циркуляции.

В термическом состоянии СЛО выявлено несколько периодов потепления и похолодания вод атлантического слоя во второй половине XX в. Результаты моделирования показывают, что процесс потепления океана может быть обусловлен различными причинами. Так, по результатам численного моделирования потепление 1960-х годов произошло в результате сокращения потери тепла в ядре атлантических вод из-за усиления вертикальной стратификации вод за счет распреснения поверхностного слоя океана. Потепление 1990-х годов в результатах расчетов вызвано усилением потока теплых вод через пролив Фрама и Баренцево море и прослеживается в виде теплового сигнала, распространившегося в потоке пограничного течения вдоль всей акватории Арктического бассейна (рис. 4).

Результаты численного эксперимента показали, что во второй половине XX в. в поле течений СЛО произошли существенные изменения. Установление продолжительной положительной фазы САК, начало которой совпадает с серединой 1970-х годов, привело в модельных расчетах к усилению потока атлантических вод в Арктический бассейн, сдвигу области распространения тихоокеанской водной массы на восток, подъему атлантических вод к поверхностному слою, увеличению температуры промежуточного слоя океана, сокращению ледового покрова.

Численные эксперименты по исследованию влияния межгодовой изменчивости речного стока Сибирских рек на перераспределение пресной воды в Арктическом бассейне и Северной Атлантике показали, что избыток или дефицит пресной воды приводят к изменению циркуляции внутри бассейна и перераспределению потока пресной воды между проливом Фрама и проливами Канадского Архипелага, что в дальнейшем меняет пути его распространения в Северной Атлантике [31].

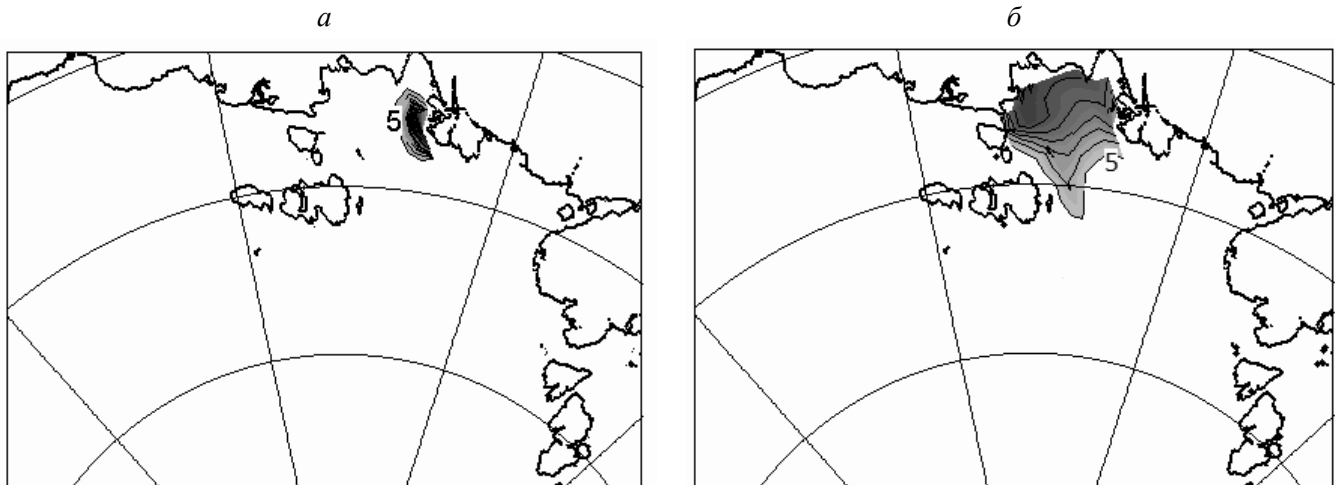


Рис. 5. Пространственное распределение растворенного метана в море Лаптевых (нмоль/л), полученное в численном эксперименте с окислением для 2008 г. с заданными источниками в устье р. Лены: *а* – май (максимальная концентрация 75 нмоль/л); *б* – сентябрь (максимальная концентрация 65 нмоль/л)

3.5. *Моделирование гидрохимических процессов в Арктическом океане.* Как отмечено выше, гидрохимические процессы в Мировом океане могут существенным образом влиять на газовый состав атмосферы. Одним из газов, усиливающих парниковый эффект, является метан. Как показали исследования последних десятилетий, в Арктической зоне Мирового океана сосредоточены большие запасы метана в виде газогидратов. Изменение термического состояния океана может вызвать дестабилизацию метангидратов с последующим выходом  $\text{CH}_4$  в атмосферу.

В связи с этой проблемой акад. А. С. Алексеевым была инициирована разработка в ИВМиМГ СО РАН модели распространения растворенных газов в Мировом океане, которая в комплексе с моделью циркуляции позволила провести сценарные эксперименты по возможному поступлению растворенного метана из океана в атмосферу [32].

В работе представлены результаты по исследованию распространения растворенного метана в Северном Ледовитом океане, связанного с выносом метана сибирскими реками. Для проведения численного эксперимента использовались поля течений, рассчитанные по модели Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики для временного периода с 1948 по 2010 гг. [20, 21]. Распределение растворенного метана получено как решение адвективно-диффузионного уравнения распространения примеси. Высокие значения концентрации растворенного метана на боковой границе Арктического бассейна задаются в дельтах рек Обь, Енисей, Лена, Яна, Колыма, Индигирка для параметризации переноса примеси, поступающей в океан с речным стоком.

В ходе численных экспериментов задавались концентрации растворенного метана в эстуариях сибирских рек в соответствии с данными измерений [33]. Показано, что сток реки Лены вносит наибольший вклад в формирование аномально высоких концентраций метана в шельфовых водах Северного Ледовитого океана относительно других рек. Полученное распределение метана в море Лаптевых для 2008 г. в результате его выноса речным стоком Лены представлено на рис. 5. Максимальные значения метана появляются в мае, при этом концентрация достигает значения 75 нмоль/л. Дальнейшее распространение происходит в соответствии с системой течений. В результате распространение метана происходит в циклоническом направле-

нии, и к сентябрю максимальные значения 65 нмоль/л определяются у пролива Дмитрия Лаптева. Процессы его накопления в течение года отсутствуют за счет учета в модели параметризации окисления метана.

3.6. *Моделирование речного стока для Сибирского региона.* Глобальный гидрологический цикл в атмосфере и океане играет важнейшую роль в определении климатического состояния на Земле. Особый интерес в последнее время проявляется к региональным характеристикам гидрологического цикла, в частности, в Сибирском регионе [34].

Модель ИВМиМГ СО РАН является линейной резервуарной моделью в ячейках сетки. Скорость изменения стока из резервуара или каскада резервуаров в варианте модели Калинина – Милюкова [35, 36] определяется на основе последовательного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, сведенных к интегралам свертки. В конкретной реализации модели поток воды на суше разделяется на три составляющие: поверхностный, грунтовый и речной стоки. Поверхностный и грунтовый стоки представляют собой единичные ячейки, а речной сток имеет вид каскадов ячеек. Количество каскадов вычисляется по размеру, наклону ячеек и величине коэффициента задержки. В каждой ячейке производится учет процентного содержания болот и озер [37–39].

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, соответствующее разрешению в региональной климатической модели ИВМиМГ СО РАН, составляющее 1/3 градуса по широте и долготе соответственно. В работах [38–40] представлены результаты расчетов по модели климатического речного стока для бассейнов рек Обь-Иртыш, Енисей, Лена. Построение направлений речного, поверхностного и грунтового стоков строилось на основе данных о рельефе и анализа графов стоков по поверхности и в речном русле. Были проведены анализ данных по изменению климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек во второй половине XX века и численные расчеты по моделированию межгодовой изменчивости стока рек Обь, Енисей, Лена на основе данных реанализов NCEP/NCAR, ECMWF/ERA40 и GMAO/MERRA. Результаты расчетов сравнивались с данными наблюдений на гидрологических постах Обь – Салехард, Енисей – Игарка, Лена – Кюсюр.

Результаты моделирования стока, проведенного на основе данных реанализов ERA40, MERRA [40], дают достаточно хорошее соответствие годовых климатических стоков данным наблюдений (рис. 6). Климатические годовые гидрографы имеют достаточное совпадение в амплитуде и фазе для максимальных значений стока, в особенности для реанализа ERA40. Распределение годовых стоков для выбранного периода характеризуются различиями для дисперсий и взаимных корреляций, в особенности для р. Енисей.

**Заключение.** Сибирский регион, характеризующийся большими пространственными масштабами, является климатической зоной с континентальным и резко континентальным климатом в центральной части. Следствием этого своеобразия может являться то, что изменения климата на Земле в глобальном масштабе будут определенным образом проявляться в данном регионе, вызывая изменения характерных региональных составляющих климатического цикла. С другой стороны, активное использование ресурсов Сибири, Дальнего Востока и Арктического региона, включая Сибирский шельф, с сопутствующими процессами вырубki лесов, осушения

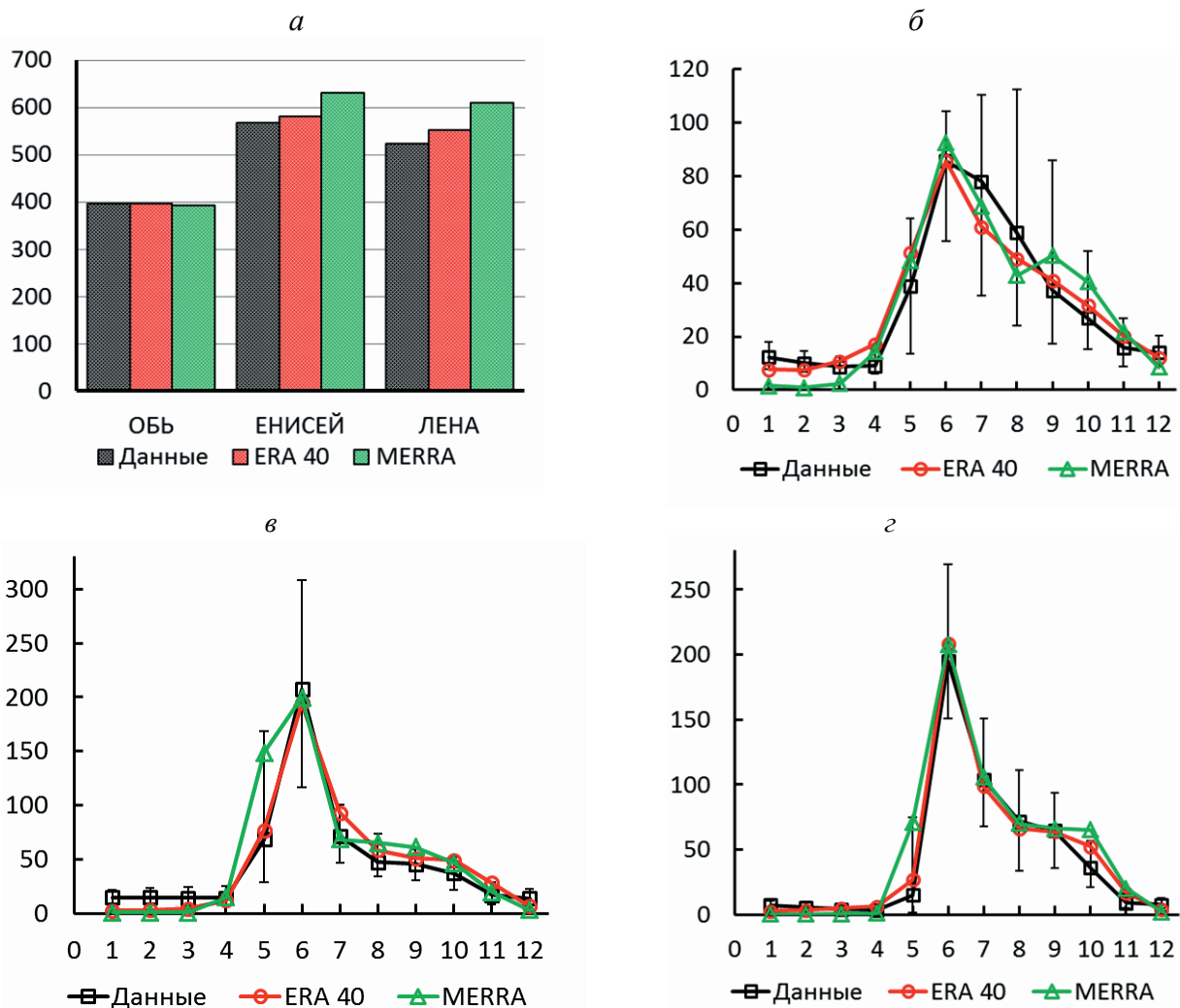


Рис. 6. Годовые климатические стоки (а); климатические годовые гидрографы рек Обь (б), Енисей (в), Лена (з) ( $\text{км}^3$ ). Вертикальные линии на графиках характеризуют шкалу колебаний стоков данных измерений в течение всего периода

болот на больших площадях, загрязнения воздуха и прибрежных вод Тихого и Ледовитого океанов, могут проявляться в глобальных изменениях климатической системы.

Основные причины глобальных изменений климата определяются годовым балансом количества тепла, полученного планетой, его распределением в пространстве и сезонным распределением этого баланса.

Все факторы, воздействующие на климат, взаимосвязаны, их сложное нелинейное взаимодействие может быть оценено только на основе комплексного моделирования с использованием совместных климатических моделей.

В работе представлены шаги развития климатической системы атмосфера – биосфера – почва – океан и приведен ряд результатов по математическому моделированию термодинамических и биохимических процессов в компонентах системы. Результаты численных экспериментов, проведенных для каждого из компонентов климатической системы, позволяют сделать вывод об адекватном описании моделируемых характеристик. Этот факт создает предпо-

ссылки для дальнейшей интеграции блоков совместной климатической модели в целях изучения климата Сибири.

## Список литературы

1. BOVILLE B. A., GENT P. R. The NCAR Climate System Model, Version One // *J. Climate*. 1998. V. 11. P. 1115–1130.
2. ROECKNER E., ARPE K., BENGTTSSON L., ET. AL. Simulation of the present-day climate with the ECHAM model: Impact of model physics and resolution // Hamburg, 1992. (Report / Max-Planck-Institut fur Meteorologie, N 93).
3. VOLDOIRE A., SANCHEZ-GOMEZ E., SALAS Y MÉLIA D., ET. AL. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation // *Clim. Dyn.* V. 40. Issue 9–10. P. 2091–2121, DOI:10.1007/s00382-011-1259-y.
4. АЛЕКСЕЕВ В. А., ВОЛОДИН Е. М., ГАЛИН В. Я. и др. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели А5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе AMIP II. М.: ИВМ РАН, 1998.
5. GIORGI F., MEARN L. Approaches to the simulation of regional climate change, A review // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 29. P. 191–216.
6. CUBASCH U., H. VON STORCH, WASZKEWITZ J., ZORITA E. Estimates of climate change in southern Europe using different downscaling techniques // Report No. 183, Max-Planck Institut fur Meteorologie, Hamburg, Germany, 1996.
7. DETLOFF K., RINKE A., LEHMANN R., ET. AL. Regional climate model of the Arctic atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 23401–23422.
8. KRUPCHATNIKOFF V. Simulation of CO<sub>2</sub> exchange in the atmosphere surface biomes system by climate model ECSib // *Russian J. Num. Anal. and Math. Modelling*. 1998. V. 13. N 6. P. 479–492.
9. DICKINSON R. E., HENDERSON-SELLERS A., KENNEDY P. J. Biosphere - atmosphere scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model // Boulder, Colo., 1993. (Tech. Note NCAR / National Center for Atmos. Res., N TN – 387 +STR).
10. SELLERS P. J., MINTZ Y., SUD Y. C., DALCHER A. A simple biosphere model (SiB) for use within General Circulation Models // *J. Atmos. Sci.* 1986. V. 43. P. 505–531.
11. VERSEGHY D. L., MCFARLANE N. A., LAZARE M. CLASS-A Canadian land surface scheme for GCMs, II. Vegetation model and coupled runs // *Int. J. Climatol.* 1993. V. 13. P. 347–370.
12. BODEN M. A., KAISER D. P., SEPANSKI R. J., STOSS F. W. Trends'93: A Compendium of Data on Global Change. Tennessee, 1994.
13. КРУПЧАТНИКОВ В. Н., КРЫЛОВА А. И. Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли // *Оптика атмосферы и океана*. 2000. № 6–7, С. 622–626.
14. SPIVAKOVSKY C. M., YEVICH R., LOGAN J. A., ET. AL. Tropospheric OH in a 3-D chemical tracer model: an assessment based on observations of CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. N D11. P. 18441–18471.
15. FOMENKO A. A., KRUPCHATNIKOFF V. N. A finite-difference model of atmospheric dynamics with conservation laws // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc.* 1993. N 1. P. 17–31.
16. FOMENKO A. A., KRUPCHATNIKOFF V. N., YANTZEN A. G. A finite-difference model of atmosphere (ECSib) for climatic investigations // *Bull. Nov. Comp. Center, Num. Model. in Atmosph., etc.* 1996. N 4. P. 11–19.
17. КРУПЧАТНИКОВ В. Н., ФОМЕНКО А. А. Математическое моделирование регионального климата Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 6. С. 1–6.

18. КУЗИН В. И. Метод конечных элементов в моделировании океанических процессов. Новосибирск: СО АН СССР, 1985.
19. ГОЛУБЕВА Е. Н., ИВАНОВ Ю. А., КУЗИН В. И., ПЛАТОВ Г. А. Численное моделирование циркуляции Мирового океана с учетом верхнего квазиоднородного слоя // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 3. С. 395–401.
20. GOLUBEVA E. N., PLATOV G. A. On improving the simulation of Atlantic Water circulation in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. C04S05, doi:10.1029/2006JC003734.
21. ГОЛУБЕВА Е. Н. Численное моделирование динамики Атлантических вод в Арктическом бассейне с использованием схемы QUICKEST // *Вычислительные технологии*. 2008. Т. 13. № 5. С. 11–24.
22. ГОЛУБЕВА Е. Н. Изучение роли температурно-соленостных аномалий в формировании режимов меридиональной циркуляции Мирового океана // *Сиб. журн. выч. матем. РАН. Сиб. отд-ние. Новосибирск*. 2010. Т. 13. № 3. С. 155–167.
23. HELLERMAN S., ROSENSTEIN M. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates // *J. Phys. Oceanogr.* 1983. № 13. P. 1093–1104.
24. LEVITUS S. Annual cycle of temperature and heat storage in the World Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1984. № 14. P. 727–746.
25. LEVITUS S. Annual cycle of salinity and salt storage in the World Ocean // *J. Phys. Oceanogr.* 1986. № 16. P. 322–343.
26. OBERHUBER J., ROECKNER E., CHRISTOPF M., ESCH M., LATIF M. Predicting the '97 El Nino event with a global climate model // Hamburg, 1998. (Report / Max-Planck-Institut fur Meteorologie, N 254).
27. VENZKE S., LATIF M., VILLWOCK A. The coupled GCM ECHO- 2. Part II: Indian ocean response to ENSO // Hamburg, 1997. (Report / Max-Planck-Institut fur Meteorologie, N 246).
28. КУЗИН В. И., МОИСЕЕВ В. М. Анализ результатов диагностических и адаптационных расчетов в северной части Тихого океана // *Известия АН, сер. ФАО*. 1996. Т. 32. № 5. С. 680–689.
29. KALNAY E., KANAMITSU M., KISTLER R., ET. AL. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996. N. 77. P. 437–471.
30. ГОЛУБЕВА Е. Н., ПЛАТОВ Г. А. Численное моделирование отклика Арктической системы океан-лед на вариации атмосферной циркуляции 1948 – 2007 гг. // *Известия РАН, серия ФАО*. 2009. Т. 45. № 1. С. 145–160.
31. КУЗИН В. И., ПЛАТОВ Г. А., ГОЛУБЕВА Е. Н., МАЛАХОВА В. В. О некоторых результатах численного моделирования процессов в Северном Ледовитом океане // *Известия РАН. ФАО*. 2012. Т. 48. № 1. С. 117–136.
32. ЩЕРБАКОВ А. В., МАЛАХОВА В. В. Математическое моделирование потока метана в атмосферу в результате разложения метангидратов Мирового океана // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 485–489.
33. ШАХОВА Н. Е., СЕМИЛЕТОВ И. П., БЕЛЬЧЕВА Н. Н. Великие Сибирские реки как источники метана на Арктическом шельфе // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 414. № 5. С. 683–685.
34. SHIKLOMANOV I. A., SHIKLOMANOV A. I., LAMMERS R. B., ET. AL. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // in *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*, edited by E.L.Lewis et al.. Kluwer Acad., Norwell, Mass. 2000. P. 281–296.
35. КУЧМЕНТ Л. С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
36. БУРАКОВ Д. А. К оценке параметров линейных моделей стока // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 10. С. 89–95.
37. HAGEMANN S., DUMENIL L. Hydrological discharge model // Technical report N. 17. MPI, Hamburg. 1998.

38. КУЗИН В. И., ЛАПТЕВА Н. А. Моделирование климатического речного стока для Сибирского региона // Труды IV Международного конгресса "ГЕО-Сибирь-2008". 2008. Новосибирск. С. 65–70.

39. КУЗИН В. И., ЛАПТЕВА Н. М. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 06. С. 539–543.

40. КУЗИН В. И., ЛАПТЕВА Н. А. Моделирование климатического речного стока для Сибирского региона // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Сборник докладов XIX Международный симпозиум. [Электрон. ресурс] Томск. Издательство ИОА СО РАН. 2013. CD-ROM. С. D371-D374.

*Кузин Виктор Иванович – д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: kuzin@sscc.ru;*

*Крупчатников Владимир Николаевич – д-р физ.-мат. наук, проф. Новосибирского государственного университета, директор Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института; e-mail: vkрупчатnikov@yandex.ru;*

*Голубева Елена Николаевна – д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: elen@ommfao.sccc.ru*

*Платов Геннадий Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: plat@ommfao.sccc.ru;*

*Малахова Валентина Владимировна – канд. физ.-мат. наук, науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: malax@sscc.ru;*

*Крылова Алла Ивановна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: alla@climate.sccc.ru;*

*Лаптева Наталья Александровна – мл. науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: lapteva@vector.nsc.ru;*

*Фоменко Александр Алексеевич – д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сопр. Института вычислительной математики и математической геофизики; e-mail: foma@climate.sccc.ru*

Дата поступления – 03.06.13