



## **Математическое моделирование климатической системы «ледники–океан–атмосфера» и других природных процессов в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН**

Анатолий Петрович ОРЕШКО

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

aporeshko@gmail.com

Сергей Михайлович КРАСНОПЕЕВ

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

sergeikr@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8409-7062>

**Аннотация.** В статье дается краткий обзор результатов исследований ТИГ ДВО РАН в области математического моделирования климатической системы «ледники–океан–атмосфера». Одной из первых в Тихоокеанском институте географии была создана лаборатория математического моделирования климата. Целью ее создания были исследования по выявлению сути физических механизмов формирования климата и разработка на их основе работоспособных математических моделей с иерархией пространственно-временного разрешения. В области изучения общих свойств и особенностей формирования длиннопериодных колебаний в климатической системе ряд разработок, выполненных в лаборатории математического моделирования климата ТИГ ДВНЦ АН СССР, имеет общепризнанное мировое значение. Была разработана гидродинамическая модель глобальной системы «ледники–океан–атмосфера», предназначенная для воспроизведения длиннопериодных колебаний климата и оледенения Земли в плейстоцене. Предложенная эффективная численная схема открыла возможность проведения численных экспериментов на уже существующих в то время за рубежом ЭВМ. В 1978 г. в рамках межправительственного советско-американского соглашения о сотрудничестве в области исследований окружающей среды, медицины и космоса такие эксперименты были проведены в Национальном центре атмосферных исследований (NCAR, Boulder, Co.) на суперкомпьютере CRAY-1. Был решен ряд проблем, связанных с построением замкнутых гидродинамических моделей всех компонент глобальной системы «ледники–океан–атмосфера». Разработанная статистическая модель регионального климата обеспечила возможность восстановления региональной структуры климатических полей по их известным крупномасштабным характеристикам. С конца 1980-х – начала 1990-х гг., когда лаборатория лишилась вычислительной базы, основные исследования были ориентированы на математическое моделирование природных процессов. Наиболее значимые из них: разработка математической модели морского льда и оценка на ее основе термодинамических характеристик Тугурского залива при создании приливной электростанции; разработка математической модели многовидовых растительных сообществ («мхи», «травы» и «деревья») с учетом конкуренции за ресурсы; разработка математической модели термодинамического режима деятельного слоя почвогрунтов криолитозоны и эмиссии углерода из почвы в атмосферу с учетом источников тепла биогенного происхождения.

**Ключевые слова:** климат, колебания климата, математическая модель, система «ледники–океан–атмосфера», природные процессы.

**Для цитирования:** Орешко А.П., Краснопеев С.М. Математическое моделирование климатической системы «ледники–океан–атмосфера» и других природных процессов в Тихоокеанском институте географии ДВО РАН // Тихоокеанская география. 2022. № 4. С. 5–16. [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2022\\_12\\_1](https://doi.org/10.35735/26870509_2022_12_1). EDN: AZBURS.

Original article

## Mathematical modeling of the climate system “glaciers–ocean–atmosphere” and other natural processes at Pacific Geographical Institute FEB RAS

Anatoly P. ORESHKO  
Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, aporeshko@gmail.com

Sergey M. KRASNOPEYEV  
Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, sergeikr@tigdvo.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-8409-7062>

**Abstract.** The article gives a brief overview of the research results of PGI FEB RAS in the field of mathematical modeling of the climate system “Glaciers–Ocean–Atmosphere”. A laboratory of mathematical climate modeling was among the first labs at the Pacific Institute of Geography (former name of PGI). The purpose of its creation was to research the essence of the physical mechanisms of climate formation and the development of efficient mathematical models with a hierarchy of spatio-temporal resolution on this basis. In the field of studying the general properties and features of the formation of long-period fluctuations in the climate system, a number of developments carried out in the laboratory of mathematical climate modeling of the Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, have a generally recognized world significance. A hydrodynamic model of the global system “glaciers–ocean–atmosphere” was developed, designed to reproduce long-period climate fluctuations and glaciation of the Earth in the Pleistocene. The proposed effective numerical scheme has opened the possibility of conducting numerical experiments on already existing computers at that time abroad. In 1978, within the framework of the intergovernmental Soviet-American agreement on cooperation in the field of environmental, medical and space research, such experiments were conducted at the National Center for Atmospheric Research (NCAR, Boulder, Co.) on a CRAY-1 supercomputer. A number of problems were solved related to the construction of closed hydrodynamic models of all components of the “Glacier–Ocean–Atmosphere” global system. The developed statistical model of the regional climate made it possible to reconstruct the regional structure of climatic fields based on the well-known large-scale characteristics of these fields. Since the late 1980s–early 1990s, when the laboratory lost its the computing base, the main studies were focused on mathematical modeling of natural processes. The most significant of them: the development of a mathematical model of sea ice and the assessment of the thermodynamic characteristics of the Tugur Gulf on its basis when creating a tidal power plant; development of a mathematical model of multi-species plants (“mosses”, “grasses” and “trees”) communities taking into account competition for resources; development of a mathematical model of the thermodynamic regime of the active layer of cryolithozone soils and carbon emissions from soil into the atmosphere, taking into account heat sources of biogenic origin.

**Keywords:** climate, climate Fluctuations, mathematical model, “Glaciers–Ocean–Atmosphere” system, natural processes.

**For citation:** Oreshko A.P., Krasnopeyev S.M. Mathematical modeling of the climate system “glaciers–ocean–atmosphere” and other natural processes at Pacific Geographical Institute FEB RAS. *Pacific Geography*. 2022;(4):5-16. (In Russ.). [https://doi.org/10.35735/26870509\\_2022\\_12\\_1](https://doi.org/10.35735/26870509_2022_12_1).

*Человеку ничего не оставалось бы  
требовать от бога,  
если бы он научился правильно  
предсказывать погоду.*

М.В. Ломоносов

## **Введение**

Одними из первых в ТИГ ДВО РАН были созданы лаборатории математического моделирования климата и энергомассообмена. Их возглавили соответственно кандидаты наук Владимир Яковлевич и Сергей Яковлевич Сергины, уже имевшие признание в научной среде за разработку математической модели глобальной климатической системы. Ценность данной модели заключалась в том, что она предоставляла возможность объяснения причинных механизмов изменений природной среды.

Дальнейшие исследования, направленные на выявление сути физических механизмов формирования климата и создание на этой основе работоспособных математических моделей с иерархией пространственно-временного разрешения, стали долговременной программой лаборатории математического моделирования климата. В лаборатории сложился сильный коллектив математиков, это были выпускники МФТИ (А.В. Вертель, Б.С. Струков, Н.А. Ююкин, В.В. Корняк), мехмата МГУ (М.С. Пермяков) и Дальневосточного государственного университета (А.П. Орешко, В.М. Карпец, А.В. Лапшин, Л.М. Ельцов, А.Т. Караченов, Н.Д. Вознесенский). Позднее коллектив лаборатории пополнился как молодыми специалистами (В.П. Елисеев, С.М. Краснопеев, А.А Шипулин), так и признанным специалистом в области океанологии (В.И. Чупрынин).

В мае 1974 г. В.Я. Сергин защитил докторскую диссертацию по физико-математическим наукам. Несколько позднее докторскую диссертацию по географическим наукам, посвященную ледниковым событиям плейстоцена, защитил и С.Я. Сергин. К началу 1980-х гг. по результатам исследований стало ясно, что причины глобальных колебаний климата и оледенения Земли, по выражению В.Я. Сергина, «перестали быть загадкой естествознания и перешли в разряд проблем, доступных строгому научному исследованию» [1]. Продолжение исследований требовало мощных компьютеров, а их не было и не предвиделось в обозримом будущем. В отсутствие ясной перспективы дальнейших исследований физических механизмов формирования климата В.Я. Сергин перешел на работу в Институт проблем управления АН СССР. С этого момента лабораторию математического моделирования климата возглавил кандидат физико-математических наук Анатолий Петрович Орешко, а позже кандидат физико-математических наук С.М. Краснопеев.

## **Результаты и их обсуждение**

Модельное изучение динамических свойств отдельных естественных компонентов климатической системы показало, что они распадаются, по крайней мере, на три группы или подсистемы. Группа А ответственна за формирование относительно медленных (с масштабом около 1 тысячи лет и более) изменений глобального состояния климатической системы; группа Б – за гораздо более быстрые (от сезона до десятков лет) вариации; группу В составляют внешние к рассматриваемой климатической системе факторы. Такое разделение является обоснованием квазинезависимого (до известных пределов) моделирования подсистем и даже отдельных компонентов, что позволяет верифицировать

модели, а в ряде случаев и определять их параметры, а также предоставляет возможности для эффективного объединения данных подсистем с точки зрения реализации. При этом приближенное и имеющее контролируруемую точность моделирование динамики подсистем А и Б осуществляется последовательно, поэтапно. Например, при условиях, определяемых в рамках такой теории, эволюция подсистемы Б происходит на фоне «замороженных» (временно зафиксированных) характеристик подсистемы А, которые играют роль квазистационарных (почти постоянных на рассматриваемом промежутке времени эволюции подсистемы Б) краевых условий и параметров. Наоборот, рассматривая эволюцию подсистемы А, обратное воздействие на нее подсистемы Б можно приближенно заменить характеристиками блока Б, эффективно осредненными по временам порядка масштабов «замороженности» блока А.

Соблюдение принципа соответствия между сложностью модели, качеством исходных данных и результатами позволяет продвинуться в понимании общих физических механизмов действия климатической системы при использовании достаточно простых «малопараметрических» моделей.

За рядом выполненных в лаборатории математического моделирования климата ТИГ ДВНЦ АН СССР разработок по изучению общих свойств и особенностей формирования длиннопериодных колебаний в климатической системе, включая условия их возникновения, правильное воспроизведение амплитудных и фазовых характеристик при минимуме дополнительных гипотез, был общепризнан мировой приоритет.

Первые попытки построения динамических моделей палеоклимата были предприняты в лаборатории в 1970-х гг. [2]. В их основе лежал анализ термодинамической модели глобальной системы, включающей океан, атмосферу и континентальные ледниковые покровы. Модели строились с использованием существенных упрощений и сводились к системе обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Тем не менее вычисленные колебания климата и оледенения Земли совпадали по порядку величин с данными палеоклиматических и палеогеографических реконструкций. Результаты были интересны в том отношении, что демонстрировали возможность моделирования динамики палеоклимата в ретроспективе. Большая часть этих результатов, полученных коллективом лаборатории, систематически изложена в монографии В.Я. Сергина и С.Я. Сергина [3], их физическая обоснованность и интерпретируемость позволяли путем усовершенствования моделей повышать качество и детальность воспроизведения характеристик.

Однако упрощения, использованные при построении термодинамических моделей системы «ледники–океан–атмосфера» (ЛОА), обуславливали такие недостатки, как малое число степеней свободы, полная параметризация процессов в атмосфере и др. В моделях этого класса вычислялись лишь средние (типичные) значения переменных, а пространство учитывалось параметрически (за счет использования представлений о разности температуры между экватором и полюсом, о подобии вертикальной структуры атмосферы и т. п.).

Исходя из вышесказанного, в лаборатории математического моделирования климата была предпринята попытка построения гидродинамической модели глобальной системы «ледники–океан–атмосфера», предназначенной для воспроизведения длиннопериодных колебаний климата и оледенения Земли в плейстоцене. Необходимым условием гидродинамического моделирования таких колебаний является возможность интегрирования связанных систем уравнений гидродинамики на сроки порядка 104–105 лет. Однако интегрирование на такие долгие сроки связано со столь очевидными математическими и техническими трудностями, что указанная задача ранее даже не ставилась. Поэтому важнейшей проблемой являлась разработка численной схемы, которая позволяла бы реализовать гидродинамическую модель глобальной системы «ледники–океан–атмосфера» на высокопроизводительной ЭВМ. В лаборатории математического моделирования климата была предложена эффективная численная схема, основанная на аппроксимации решения полной системы уравнений решением вырожденной (по Тихонову) системы. Соответствующая численная процедура позволяла уменьшить время интегрирования на 2–3 порядка

по сравнению с прямым интегрированием уравнений, что открывало возможность реализации модели глобальной системы «ледники–океан–атмосфера» на уже существующих в то время за рубежом ЭВМ (например, ЭВМ CRAY-1).

Из воспоминаний В.Я. Сергина [1]:

«...В 1976 г. было заключено межправительственное советско-американское соглашение о сотрудничестве в области исследований окружающей среды, медицины и космоса. В рамках этого соглашения в сентябре 1976 г. в Ташкенте состоялся весьма представительный Советско-американский симпозиум по моделированию климата. Мой доклад о моделировании глобальных колебаний климата и оледенения Земли вызвал довольно бурную дискуссию и даже перепалку между видными американскими учеными, профессором С. Манабе из Принстонского университета и профессором Дж. В. Ким из Института климатических исследований США.

...В 1977 г. в соответствии с советско-американским соглашением по окружающей среде состоялся визит советской правительственной делегации в США.

... Приблизительно с этого времени между СССР и США начался обмен учеными в области исследования окружающей среды. Американцы прислали список советских ученых, которых они хотели бы видеть у себя, там было и мое имя. В апреле 1978 г. я был командирован в США на 6 мес. в соответствии с программой обмена учеными. Со мной отправился высококвалифицированный программист В. Александров из ВЦ АН СССР.

...Выделенное в Национальном центре атмосферных исследований (NCAR, Boulder, Co.) машинное время на суперкомпьютере CRAY-1 В. Александров использовал очень эффективно, и мы получали все новые и новые результаты. Соответственно нам добавляли и добавляли машинное время. Кончилось тем, что мы израсходовали более 100 часов машинного времени.

...Кроме того, мы разработали глобально-региональную версию отображения атмосферной циркуляции для нескольких регионов: Северной Атлантики и Европы; Сибири; Дальнего Востока и Антарктики. На CRAY-1 мы сделали компьютерные фильмы атмосферной циркуляции как телескопирование глобальных процессов для каждого из этих регионов. Для Атлантики и Европы получилась характерная картина западного переноса с цепочками циклонов, которые зарождались на юге экватории и двигались на северо-восток, пересекали Европу и затухали на севере региона. В Сибири хорошо воспроизводился устойчивый январский антициклон с редкими вторжениями теплого воздуха с юго-запада. Муссонная циркуляция Дальнего Востока воспроизводилась слабо. Зато в Антарктике формировался четко выраженный классический антициклон (как из учебника по синоптической метеорологии С.П. Хромова) и обтекающая его по периферии череда циклонических вихрей».

Несмотря на очевидные успехи в области гидродинамического моделирования глобальной системы «ледники–океан–атмосфера», оставался ряд нерешенных проблем. В частности, не существовало замкнутых гидродинамических моделей всех компонент глобальной системы ЛОА, и в лаборатории впервые были построены некоторые такие модели.

Так, В.В. Корняк с помощью математических методов исследовал ряд вопросов по теории компонентов климатической системы [4]. Н.А. Ююкин изучал связи между переменными и явлениями и приложение мер связи к задачам климата [5].

А.Т. Караченов продолжал развивать функциональную схему динамической модели палеоклимата в сосредоточенных параметрах, вводя более сложные зависимости, например, раздельный учет влияния полушарий [6]. Вместе с Н.Д. Вознесенским он проводил с этой моделью численные эксперименты по динамике палеоклимата [7].

А.В. Вертедем по блоку А построена и исследована трехмерная гидродинамическая модель континентальных ледниковых покровов (ЛП) земной коры [8, 9]. На первом этапе работы по этой теме большой вклад внес Б.С. Струков [10, 11]. На основе модели были изучены особенности квазистационарного состояния и динамики Антарктического, Гренландского и Лаврентьевского ледниковых щитов. Исследованы устойчивость этих щитов и их чувствительность к изменениям внешних условий. Разработана серия математических

моделей континентальных ледниковых покровов, предназначенных для решения ряда прямых и обратных задач гляциомеханики, связанных с моделированием динамики климатической системы Земли. Реализованы и апробированы численные методы и алгоритмы решения задач моделирования ледниковых покровов в распределенных параметрах, включая квазитрехмерные нестационарные задачи.

Из воспоминаний В.Я. Сергина [1]:

«...Наши модели ледовых покровов имели важное прикладное значение. В то время физики Дубны были встревожены предложениями американских ядерщиков захоронять отходы атомных реакторов в "вечных льдах" Гренландии и Антарктиды. Но длительный срок распада радиоактивных отходов вызывал сомнения в том, что льды полярных областей являются для них "вечными". Для оценки времени переноса радиоактивных отходов от мест захоронения до зоны абляции (края) ледника была необходима математическая модель. Наша модель крупных ледниковых покровов позволяла оценивать время переноса таких отходов по данным о месте и глубине захоронения».

А.В. Лапшиным была построена модель литосферы и астеносферы [12]. С ее помощью изучена динамика гляциоизостатических движений земной коры и уровня океана для плейстоцена и голоцена. Определены параметры астеносферы и найдено подтверждение возможности возникновения климатических колебаний в системе изостатических движений земной коры – континентальных ледниковых покровов – уровня океана. Модель сформулирована как компонента системы ЛОА. Однако ее можно использовать и для палеогеографических расчетов изменений уровня океана и конфигурации материков по данным об изменении размеров континентальных льдов.

Верификация модели литосферы–астеносферы позволила оценить вязкость астеносферного слоя. Сценарий изменения мощностей ледниковых покровов задавался с учетом кривой изменения уровня Мирового океана Миллимена и Эмери, данных проекта КЛИМЭП (CLIMAP – Long range Investigation, Mapping and Prediction) и географических условий районов оледенения. Показана важность учета при этом не только максимальных мощностей всех крупных ледниковых покровов, но и времени начала оледенения. Произведен сравнительный анализ влияния гляциоизостатических и эвстатических изменений уровня моря. Для сравнения с данными палеогеографии наиболее подходящим признан район внутри Североамериканского континента – юг Гудзонова залива. Получено хорошее согласование результатов экспериментов с палеоданными с точностью до уровня современных знаний по гляциальной истории отдельных районов. Построены глобальные карты изобаз абсолютных вертикальных движений земной коры. В частности, определено абсолютное опускание земной коры в эпоху максимального оледенения для эпицентров Лаврентьевского, Североевропейского и Антарктического ледниковых покровов, а также изменение этих характеристик относительно меняющегося уровня Мирового океана.

При интегрировании уравнений модели ЛОА на долгие сроки основная часть машинного времени тратится на атмосферный блок. Поэтому чрезвычайно актуальной задачей являлась разработка климатической модели атмосферы, которая позволяла бы воспроизводить осредненные по времени поля метеорологических элементов, их сезонные колебания и климатическую эволюцию при различных краевых условиях. По блоку Б для этих целей А.П. Орешко [13–15] была построена гидродинамико-статистическая модель атмосферы, включающая трехмерные уравнения переноса тепла и упрощенные уравнения динамики. Упрощение динамической части задачи достигалось путем расщепления поля скорости ветра на три компоненты: зонально-осредненную скорость, квазистационарное отклонение от зональной скорости и нестационарное отклонение. Для вычисления первой компоненты использовались зонально-осредненные уравнения динамики. Вторая компонента отождествлялась с квазистационарными вихрями и вычислялась с помощью геострофических соотношений, третья компонента – с подвижными циклонами и антициклонами и параметризовалась в терминах макротурбулентности. Модель учитывала основные неадиабатические притоки тепла и гидрологический цикл в атмосфере.

Большое внимание уделялось точности описания радиационных процессов в атмосфере и особенно на подстилающей поверхности (здесь ряд работ был выполнен Л.М. Ельцовым и М.С. Пермяковым [16]). Пространственный перенос тепла и влаги вычислялся с контролем сохранения полного тепло- и влагосодержания атмосферы. Область применения модели – прогнозная оценка и диагностические исследования изменений осредненных по времени метеополей, обусловленных их естественными вариациями или антропогенным влиянием на окружающую среду. На модели был проведен ряд экспериментов по воспроизведению и исследованию январской циркуляции атмосферы, сделана оценка влияния удвоения концентрации углекислого газа на характеристики циркуляции. Время расчета на ЭВМ на данной модели на 1–2 порядка меньше, чем аналогичного расчета на традиционных моделях, основанных на примитивных уравнениях. Версия модели представляла собой определенный вклад в создание экономичных гидродинамических моделей атмосферы, приспособленных к производительности отечественных ЭВМ. Наиболее разработанные блоки модели общей циркуляции атмосферы были внедрены для использования в Гидрометцентр СССР, ВНИИГМИ-МЦД и ГГИ Госкомгидромета.

В.И. Чупрыным была сформулирована общая модель для расчета климатических термодинамических характеристик морской воды и льда, а также разработана схема взаимодействия верхнего квазиоднородного слоя океана, морского льда и атмосферы [17]. А.А. Шипулиным подготовлены исходные данные и произведен расчет касательного напряжения ветра и компонентов вектора скорости дрейфового течения на примере Японского моря.

В.И. Чупрыным и В.М. Карпецом выполнены модельные расчеты сезонного хода толщины и положения кромки морских льдов в Арктике для современных условий и для эпохи климатического оптимума, результаты которых удовлетворительно согласуются с эмпирическими данными. С помощью модели были произведены расчеты изменений, которые может внести в характеристики морского льда и воды в Тугурском заливе Охотского моря проектируемая Тугурская приливная электростанция [18]. Исполнители работы – В.И. Чупрынин и А.П. Орешко. Кроме того, в ТОИ ДВНЦ АН СССР с использованием подготовленной исполнителями программы расчетов по модели были вычислены характеристики морского льда в Амурском заливе.

Исследовано влияние нелинейности профиля температуры в толще морского льда и изменчивости параметров верхнего слоя океана на характеристики одномерной (в виде «вертикального столба») модели системы «атмосфера–морской лед–океан» [19]. Эта работа являлась подготовительным этапом включения оптимальной схемы взаимодействия с моделью морского льда в полную трехмерную модель «атмосфера–лед–океан» для изучения сезонной и междугодовой изменчивости указанной системы. Исследовалась чувствительность системы к изменению концентрации углекислого газа, облачности и альбедо морского льда.

Таким образом, результаты первого этапа работы (1971–1985 гг.) обосновали принципиальную возможность воспроизведения больших изменений климата и оледенения Земли в позднем плейстоцене и голоцене с целью как изучения термодинамического механизма (природы) этих изменений, так и построения прогностических моделей климата.

Для следующего этапа работ (1985–1995 гг.) было характерно смещение исследовательских акцентов на интересы Дальневосточного региона как составной части глобальной климатической системы. Одним из главных факторов, формирующих особенности климатического режима Дальнего Востока России и сопредельных территорий, является резкий контраст геофизических характеристик огромных по протяженности областей Евразийского континента и Тихого океана. Эти континент и океан уникальны по своим масштабам, а взаимодействие между ними оказывает существенное влияние на характеристики циркуляционных систем атмосферы и гидросферы – важнейших компонентов рассматриваемой климатической системы, а сами особенности оказываются заметными и в планетарном масштабе.

С.М. Красношеевым была разработана региональная климатическая модель атмосферы [20]. Функция подобной модели заключается в восстановлении региональной структуры климатических полей по их известным крупномасштабным характеристикам. Был собран и занесен на магнитные носители большой объем климатологической информации по Приморскому краю. Методом эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) проанализирована статистическая структура полей температуры и осадков над территорией Приморского края. Выделены пространственные структуры различных масштабов, формирующие поля температуры и осадков в пределах 30-летнего интервала. Вычислены спектры собственных значений, по крутизне которых можно делать выводы о принципиальной возможности или невозможности восстановления региональной структуры климатических полей по их крупномасштабным характеристикам.

Выполнялись также отдельные работы, имеющие важное значение для развития теории климата. Так, В.И. Чупрыниным осуществлено математическое и лабораторное моделирование механизма возбуждения длиннопериодных колебаний в региональных системах океан–атмосфера. Анализ модельных уравнений, примененный к океаническому круговороту с учетом взаимодействия океана с атмосферой, показывает, что некоторое среднее состояние круговорота при определенных параметрах системы неустойчиво и в силу существующих нелинейных ограничений динамика изменений температуры и скорости течения выходит на режим автоколебаний [21, 22]. При этом в направлении среднего потока воды распространяется температурная волна с длиной, равной характерному размеру циркуляции. Оценки показывают, что в реальной системе океан–атмосфера могут возбуждаться колебания с периодом 4–6 лет, 2–3 года и т. д., значение максимально возможной амплитуды колебаний температуры составляет около  $10^{\circ}$ . Установлено условие, с помощью которого можно прогнозировать знак температурной аномалии в различных частях океанической циркуляции по данным об атмосферной циркуляции. Выявлена возможность генерации короткопериодных климатических автоколебаний в региональной системе и, следовательно, необходимость учета этого процесса в более общих климатических моделях.

Были исследованы нелинейные колебания, возникающие в гидродинамических системах при наличии внешних энергетических воздействий, неизменных во времени. Подробный анализ таких колебаний и сопоставление с данными наблюдений выявили их подобие с термобарическими сейшмами в атмосфере, обнаруженными В.В. Шулейкиным [23]. Поэтому их изучение имеет смысл при исследовании короткопериодных климатических изменений.

В конце 1980-х–начале 1990-х гг. лаборатория лишилась вычислительной базы для проведения полноценных НИР по основной тематике лаборатории, связанной с численным моделированием компонентов климатической системы. В связи с этим учёным советом института были внесены коррективы в тематику работы лаборатории, и в 1992 г. она была переименована в лабораторию моделирования природных систем. Направление исследований, связанное с математическим моделированием природных процессов, возглавил Владимир Иванович Чупрынин, в то время к.ф.-м.н. Среди наиболее значимых задач данного направления исследований, помимо упомянутой выше разработки математической модели морского льда и оценки на ее основе термодинамических характеристик Тугурского залива при создании приливной электростанции [19], выделялись следующие:

- Разработка математической модели многовидовых растительных («мхи», «травы» и «деревья») сообществ с учетом конкуренции за ресурсы (воду и свет) [24, 25].
- Разработка математической модели растительности, в которой детально описываются корни, листья, стволы, ветки и обмен водой и «сахаром» между ними, генерирование «сахара» под действием света, а также конкуренция видов за ресурсы.
- Разработка математической модели термодинамического режима деятельного слоя почвогрунтов криолитозоны и эмиссии углерода из почвы в атмосферу с учетом источников тепла биогенного происхождения [26].



Итогом исследований стала разработка стратегии изучения связи преобразования климата и изменения природы – детальная поэтапная модель, опирающаяся на модельные и эмпирические исследования в природе и обществе.

Сотрудники лаборатории оказывали большую помощь сотрудникам другим подразделений по использованию математических методов в обработке различных данных и построении моделей отдельных компонентов природы и территориальных структур хозяйств. Так, под руководством А.П. Орешко были разработаны электронные атласы «Эндемические заболевания на территории Приморского края» и «Обзорный электронный атлас Приморского края», официально переданный для использования в Госстрах Приморья. В.И. Чупрыниным разрабатывался общий алгоритм решения проблемы социально-экономического развития региона. Разработкой алгоритмов обработки данных занимался Г.Ш. Цициашвили. А.В. Вертель оказывал помощь в совершенствовании методики медико-географического прогнозирования опасности очагов клещевого энцефалита, в использовании математических методов обработки различных данных и построении моделей отдельных компонентов природы и территориальных структур хозяйства и населения.

### **Заключение и выводы**

Таким образом, в лаборатории математического моделирования климата до последнего времени развивались три направления НИР.

1. Моделирование глобальных длиннопериодных процессов (характерное время 1 тыс.–10 тыс. лет).
2. Моделирование глобальных короткопериодных процессов (характерное время от сезонов до десятков лет).
3. Методика перехода от глобальных гидрометеорологических характеристик к региональным (для территории Дальнего Востока). Построение специальных моделей для «климатического» диагноза и прогноза состояния растительного покрова и др. [27–30].

Первое направление было необходимо для разработки физических основ теории климата, построения полной климатической модели, проверки правильности используемых физических концепций и проверки модели на известном материале палеоклиматических эпох. Второе направление развивалось для исследования годовой и межгодовой изменчивости климатической системы, определения ее устойчивости и чувствительности к антропогенным воздействиям, для исследования различных сценариев развития природы и общества в будущем. Третье направление позволяло использовать полученные результаты по исследованию климата и прогнозные оценки по его изменению для более детализированного описания климатических процессов на ограниченной территории (в частности, для Приморского края), оценивать изменчивость растительности под влиянием климатической изменчивости, рассматривать различные аспекты циркуляции дальневосточных морей.

В результате проведенных разработок и исследований были построены модели отдельных компонентов климатической системы и ряда их простых «связок». Разработаны алгоритмы, программы, реализующие эти модели; произведены их отладка и верификация. Исследована чувствительность к изменению внешних условий и внутренних параметров. Разработаны схемы перехода от глобальных климатических характеристик к детализированным характеристикам Дальнего Востока. Проведена подготовка к объединению моделей компонентов в единую климатическую модель. На основе моделей исследованы физические особенности короткопериодных климатических колебаний. Разработаны пакеты прикладных программ по расчету климатических полей, по обработке данных наблюдений и по автоматизации научных исследований.

## Литература

1. Автобиографические воспоминания о научной деятельности Сергина Владимира и его брата Сергина Сергея. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.kostya-sergin.narod.ru/sergin\\_s\\_ya/sergin-s\\_ya.htm](http://www.kostya-sergin.narod.ru/sergin_s_ya/sergin-s_ya.htm) (дата обращения: 07.10.2022).
2. Сергин В.Я., Сергин С.Я. Исследование динамики колебаний климата и оледенения Земли // ДАН СССР. 1969. Т. 186, № 4. С. 879–901.
3. Сергин В.Я., Сергин С.Я. Системный анализ проблемы больших колебаний климата и оледенения Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 280 с.
4. Корняк В.В., Васильев А.П. Приближение дифференциального оператора одного вида // Моделирование планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 90–96.
5. Ююкин Н.А. Детерминированная модель для оценки взаимосвязи явлений // Математические методы в экологии и географии. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1978, С. 31–36.
6. Караченов А.Т. Функциональная схема динамической модели палеоклимата // Исследования некоторых компонентов планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 88–95.
7. Вознесенский Н.Д., Глаголев В.Н., Сергин В.Я. Численные эксперименты по динамике палеоклимата // Исследования некоторых компонентов планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток, 1977. С. 56–70.
8. Вертель А.В. Модель нестационарного ледникового щита в первом длинноволновом приближении // Численные эксперименты по динамике глобального климата. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 117–130.
9. Вертель А.В. О расчете некоторых квазистационарных характеристик Антарктического и Гренландского оледенений // Численное моделирование компонентов глобальной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 50–73.
10. Сергин В.Я., Струков Б.С. Транспортная модель ледникового покрова // Геофизические исследования планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 52–59.
11. Струков Б.С. Климатические модели континентальных льдов // Математическое моделирование планетарных геофизических процессов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 47–62.
12. Лапшин А.В. Гидродинамическая модель гляциоизостатических движений земной коры // Моделирование планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 96–104.
13. Орешко А.П. Модель общей циркуляции атмосферы, предназначенная для интегрирования на долгие сроки // Исследования некоторых компонентов планетарной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 3–26.
14. Орешко А.П. Принципы построения глобально-региональной модели климата Дальнего Востока // Роль географии в ускорении научно-технического прогресса: Тр. VIII конф. географов Сибири и ДВ. Иркутск, 1986. Вып. 2. С. 122.
15. Сергин В.Я., Орешко А.П. Осредненная трехмерная гидродинамическая модель атмосферы // ДАН СССР. 1985. Т. 281, № 5. С. 1079–1084.
16. Ельцов Л.М. Некоторые оценки влияния изменений облачности на радиационный бюджет земной поверхности // Математическое моделирование планетарных геофизических процессов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 127–132.
17. Chuprynin V.I., Oreshko A.P. A box thermodynamic model of sea ice // *Glaciers-Ocean-Atmosphere Interact. Intern. Symposium, St. Petersburg, 24–29 Sept, 1990. IAHS Publ. England, 1991, M 208. P. 73–84.*
18. Chuprynin V.I., Oreshko A.P., Ivanov A.V. Computation of the ice extent for the Tugur tidal power plant basin // *The sixth intern. Symposium on Okhotsk sea and sea ice, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 1991. P. 310–314.*
19. Орешко А.П., Чупрынин В.И. Исследование свойств и сравнение моделей горизонтально-однородного снежно-ледового морского покрова с полиномиальным распределением температуры по вертикали. М.: ВИНТИ, 1989. Деп. № 5009-B89.
20. Краснопеев С.М. Воспроизведение региональной структуры климатических полей в задачах моделирования климата // Численное моделирование компонентов глобальной системы «ледники–океан–атмосфера». Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 29–43.
21. Чупрынин В.И. Разрывные автоколебания в геофизических системах. М.: Наука, 1985. 96 с.
22. Чупрынин В.И., Тоголин Э.В. Исследование автоколебаний в модели системы океан–атмосфера // Тр. ДВНИГМИ. Л.: Гидрометеиздат, 1976. № 60. С. 122–128.
23. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
24. Зимов С.А., Чупрынин В.И. Устойчивые состояния экосистем Северо-Востока Азии // ДАН СССР. 1989. Т. 308, № 6. С. 1510–1514.
25. Зимов С.А., Чупрынин В.И. Экосистемы: устойчивость, конкуренция, целенаправленное преобразование. М.: Наука, 1991. 160 с.
26. Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M., Davydova A.I., Zimov N.S., Chuprynin V.I., Molchanova L.A., Schuur T., Chapin F.S. The Role of the Permafrost Reservoir in the Global Carbon Budget // *A Supplement to Eos, Transaction, American Geophysical Union, 2004. Vol. 85, N. 47. C. B31A-0204.*

27. Краснопеов С.М. Использование статистической модели регионального климата для исследования реакции лесных экосистем Приморского края на изменение климата, вызванное удвоением концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере. М.: ВИНТИ, 1988. Деп. № 2719-B88.

28. Чупрынн В.И., Зимов В.А., Молчанова Л.А. Разработка математической модели, учитывающей биологический источник тепла в динамике деятельного слоя районов вечной мерзлоты // Материалы 10-го науч. совещ. географов Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, 1999. С. 178.

29. Zimov S.A., Chuprynin V.I. Climate and landscape perestroikas // Proceeding Intern.Conf. on the Role of the Polar Regions in Global Change. Abstr. Fairbanks. Alaska, 1990. Fairbanks, Alaska, 1991. Vol. 2. P. 411.

30. Zimov S.A., Chuprynin V.I., Oreshko A.P., Chapin V.C., Chapin F.C., Reynolds J. Steppe-tundra transition: an herbivore-driven biom shift at the end of the Pleistocene // American Naturalist. 1995. Vol. 146, M 5. P. 765-794.

## References

1. Memories of the scientific activity of Sergin Vladimir and his brother Sergin Sergey. Available online: [http://www.kostya-sergin.narod.ru/sergin\\_s\\_ya/sergin-s\\_ya.htm](http://www.kostya-sergin.narod.ru/sergin_s_ya/sergin-s_ya.htm) (accessed on 07 October 2022). (In Russian)

2. Sergin, V. Ya.; Sergin S. Ya. Study of the dynamics of climate fluctuations and glaciation of the Earth. In *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. Earth Science Sections*. 1969, 186(4), 879-901. (In Russian)

3. Sergin, V. Ya.; Sergin S. Ya. System analysis of the problem of large fluctuations in the climate and glaciation of the Earth. Hydrometeoizdat: Leningrad, Russia, 1978; 280 p. (In Russian)

4. Komyak, V.V.; Vasilyev A.P. Approximation of a differential operator of one type. In *Modeling the planetary system "Glaciers-Ocean-Atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR, Vladivostok: Russia, 1976, 90-96. (In Russian)

5. Yuyukin, N.A. Deterministic model to assess the relationship of phenomena. In *Mathematical methods in ecology and geography*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1978, 31-36. (In Russian)

6. Karachenov, A.T. Functional scheme of the dynamic model of paleoclimate. In *Studies of some components of the planetary system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1977, 88-95. (In Russian)

7. Voznesensky, N.D.; Glagolev, V.N.; Sergin V.Ya. Numerical experiments on the dynamics of the paleoclimate. In *Studies of some components of the planetary system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1977, 56-70. (In Russian)

8. Vertel, A.V. Model of a non-stationary glacial sheet in the first long-wave approximation. In *Numerical experiments on the dynamics of global climate*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1982. 117-130. (In Russian)

9. Vertel, A.V. About calculating some quasi-stationary characteristics of Antarctic and Greenland glaciations. In *Numerical modeling of the components of the global system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1984, 50-73. (In Russian)

10. Sergin, V. Ya.; Strukov, B.C. Transport model of the ice sheet. In *Geophysical studies of the planetary system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1974, 52-59. (In Russian)

11. Strukov, B.C. Climate models of continental ice. In *Modeling the planetary system "Glaciers-Ocean-Atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1979, 47-62. (In Russian)

12. Lapshin, A.V. Hydrodynamic model of glacioisostatic movements of the Earth's crust. In *Modeling the planetary system "Glaciers-Ocean-Atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1976, 96-104. (In Russian)

13. Oreshko, A.P. A general circulation model of the atmosphere, designed for integration for a long time. In *Studies of some components of the planetary system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1977, 3-26. (In Russian)

14. Oreshko, A.P. The principles of building a global-regional climate model of the Far East. In *The role of geography in the acceleration of scientific and technological progress: Proceedings of the VIII Conference of Geographers of Siberia and FE*. Irkutsk, Russia, 1986, 2, 122. (In Russian)

15. Sergin, V. Ya.; Oreshko A.P. Averaged three-dimensional hydrodynamic model of the atmosphere. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*. 1985, 281(5), 1079-1084. (In Russian)

16. Eltsov, L.M. Some assessments of the impact of cloud cover changes on the radiation budget of the Earth's surface. In *Mathematical modeling of planetary geophysical processes*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1978, 127-132. (In Russian)

17. Chuprynin, V.I.; Oreshko, A.P. A box thermodynamic model of sea ice. In *Glaciers-Ocean-Atmosphere Interact. Intern. Symposium, St. Peterburg, 24-29 Sept, 1990*. IAHS Publ. England, 1991, M 208. P. 73-84.

18. Chuprynin, V.I.; Oreshko, A.P.; Ivanov, A.V. Computation of the ice extent for the Tugur tidal power plant basin. In *The sixth intern. Symposium on Okhotsk sea and sea ice*. Mombetsu, Hokkaido, Japan, 1991. P. 310-314.

19. Oreshko, A.P.; Chuprynin, V.I. Study of properties and comparison of models of horizontally homogeneous snow-ice sea cover with a polynomial distribution of temperature vertically. VINITI: Moscow, Russia, 1989. № 5009-B89. (In Russian)
20. Krasnopeyev, S.M. Reconstruction of the regional structure of climatic fields in climate modeling problems. In *Numerical modeling of the components of the global system "Glaciers-Ocean-atmosphere"*. Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR: Vladivostok, Russia, 1984, 29-43. (In Russian)
21. Chuprynin, V.I. Discontinuous self-oscillations in geophysical systems. Nauka: Moscow, Russia, 1985; 96 p. (In Russian)
22. Chuprynin, V.I.; Totolin, E.V. Study of self-oscillations in the ocean-atmosphere system model. *FERHRI Proceedings*. Hydrometeoizdat: Leningrad, Russia. 1976, 60, 122-128. (In Russian)
23. Shuleykin, V.V. Physics of the sea. Nauka: Moscow, Russia, 1968; 1083 p. (In Russian)
24. Zimov, S.A.; Chuprynin V.I. Sustainable states of ecosystems in Northeast Asia. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections*. 1989, 308(6), 1510-1514. (In Russian)
25. Zimov, S.A.; Chuprynin V.I. Ecosystems: sustainability, competition, targeted transformation. Nauka: Moscow, Russia, 1991. 160 p. (In Russian)
26. Zimov, S.A.; Davydov, S.P.; Zimova, G.M.; Davydova, A.I.; Zimov, N.S.; Chuprynin, V.I.; Molchanova, L.A.; Schuur, T.; Chapin, F.S. The Role of the Permafrost Reservoir in the Global Carbon Budget. *A Supplement to Eos, Transaction, American Geophysical Union*. 2004, 85(47), B31A-0204.
27. Krasnopeyev, S.M. The use of the statistical model of the regional climate to study the reaction of forest ecosystems of the Primorsky Territory to climate change, caused by doubling of the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere. VINITI: Moscow, Russia, 1988. № 2719-B88. (In Russian)
28. Chuprynin, V.I.; Zimov, S.A.; Molchanova, L.A. Development of a mathematical model that takes into account the biological source of heat in the dynamics of the active layer of permafrost areas. In *Proc. of the 10th Scientific Meeting of Geographers of Siberia and the Far East*. Irkutsk, Russia, 1999, 178. (In Russian)
29. Zimov, S.A.; Chuprynin, V.I. Climate and landscape perestroikas. In *Proceeding Intern. Conf. on the Role of the Polar Regions in Global Change. Abstr. Fairbanks. Alaska, 1990*. Fairbanks, Alaska, 1991, V. 2, P. 411.
30. Zimov, S.A.; Chuprynin, V.I.; Oreshko, A.P.; Chapin, V.C.; Chapin, F.C.; Reynolds, J. Steppe-tundra transition: an herbivore-driven biom shift at the end of the Pleistocene. *American Naturalist*. 1995, 146, M 5, 765-794.

Статья поступила в редакцию 27.05.2022; одобрена после рецензирования 11.08.2022; принята к публикации 25.08.2022.

The article was submitted 27.05.2022; approved after reviewing 11.08.2022; accepted for publication 25.08.2022.

