

**Белорусский государственный университет**

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе



\_\_\_\_\_ А.Л. Толстик

\_\_\_\_\_ 31.05.2017

Регистрационный № УД-\_\_\_3893\_\_\_/уч.

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности  
1-31 04 08 Компьютерная физика**

Минск, 2017

Учебная программа составлена на основе ОСВО 1-31 04 08-2013; учебного плана №G31-144/уч. 2013 г. , №G31и-178/уч.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

**С.К. Бородко** — научный сотрудник лаборатории физики атмосферы Учреждения Белорусского государственного университета «Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы», магистр физико–математических наук.

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой физической информатики и атомно-молекулярной физики физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 11 от 20 апреля 2017 г. );

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета (протокол № 4 от 11 мая 2017 г.).

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа дисциплины «Компьютерное моделирование атмосферных процессов» разработана для специальности 1-31 04 08 Компьютерная физика специализации «Физическая информатика». Настоящая программа является оригинальной и разработана с учетом соответствующих требований образовательного стандарта РБ ОСВО 1-31 04 08-2013 к квалификации выпускника-специалиста «Физик. Программист».

*Цель учебной дисциплины* - ознакомить студента с вопросами моделирования физических процессов в атмосфере, применения компьютерных моделей для решения фундаментальных проблем и прикладных задач прогнозирования погоды и климата.

*Задачи учебной дисциплины* – дать основные сведения о подходах и методах компьютерного моделирования физических процессов в атмосфере. Излагаются основные принципы построения компьютерных систем моделирования гидротермодинамики атмосферы в глобальном и региональном масштабе. Рассматриваются общие методы построения численных моделей в геофизике, углубляются знания студентов в области численных методов в целом и методов вычислительной гидродинамики в частности. Излагаются общие вопросы построения схем параметризации подсеточных процессов в атмосфере, гидросфере и земной поверхности.

*Материал курса основан* на базовых знаниях и представлениях, заложенных в дисциплинах «Термодинамика и статистическая физика», «Оптика» и дисциплинах специализации «Физика атмосферы и гидросферы» и «Компьютерное моделирование распределённых физических систем».

*В результате изучения дисциплины студент должен:*

**знать:**

- основные принципы построения математических моделей в геофизике;
- особенности применения методов вычислительной гидродинамики к моделированию процессов в планетарных атмосферах;
- основные идеи, лежащие в основе воспроизведения различных классов физических процессов в атмосфере с помощью схем параметризаций;
- наиболее распространённые на данный момент системы атмосферного моделирования и ведущие исследовательские центры, отвечающие за их разработку;
- основные источники данных наблюдений (анализа) и реанализа состояния атмосферы, методологию инициализации глобальных и региональных численных моделей;
- общие представления о пределе предсказуемости атмосферных процессов в численном моделировании, теории роста ошибок, роли методов нелинейной динамики и теории динамического хаоса в атмосферном моделировании, методах ансамблевого прогнозирования.

***уметь:***

- определять применимость конкретных численных атмосферных моделей для решения определённого класса задач;
- пользоваться основными источниками данных наблюдений (анализа) и реанализа состояния атмосферы;
- работать с основными форматами данных, используемых для хранения как данных наблюдений состояния атмосферы, так и результатов численного моделирования;
- осуществлять вычислительный эксперимент по воспроизведению конкретного атмосферного явления в выбранной численной атмосферной модели;
- анализировать и визуализировать результаты моделирования.

***владеть:***

- основными понятиями предметной области.

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

*Академические компетенции:*

- уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;
- владеть системным и сравнительным анализом;
- владеть исследовательскими навыками;
- уметь работать самостоятельно;
- иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;
- иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация).

*Социально-личностные компетенции:*

Специалист должен:

- обладать качествами гражданственности;
- быть способным к социальному взаимодействию;
- обладать способностью к межличностным коммуникациям;
- владеть навыками здорового образа жизни.

*Профессиональные компетенции:*

– применять знания теоретических и экспериментальных основ физики и математики, методов измерения физических величин, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы, средств автоматизации, правового обеспечения хозяйственной деятельности и налоговой системы, государственного регулирования экономики и экономической политики;

– пользоваться глобальными информационными ресурсами, новой научной, технической и патентной литературой по физике, математике, информатике, экономике и инновационным технологиям, основами

психолого-педагогических знаний, навыками самообразования и самосовершенствования;

–применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы;

–использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационно-образовательные технологии, физические основы современных технологических процессов;

–пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иными иностранными языками как средством делового общения;

–реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности;

–осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям;

–определять цели инноваций и способы их достижения;

–применять методы анализа и внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины — 90 (2,5 зачетные единицы), из них количество аудиторных часов — 36.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы (УСР). На проведение лекционных занятий отводится 30 часов, на УСР — 6 часов.

Занятия проводятся на 5-м курсе в 9-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — экзамен (9 семестр).

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

- 1. Задача компьютерного моделирования атмосферных процессов.** История развития методов атмосферного моделирования и их применения для прогнозирования погоды и климата. Современное состояние проблемы. Многообразие исследовательских и прикладных задач, требующих применения компьютерного моделирования атмосферных процессов.
- 2. Моделирование глобальной циркуляции атмосферы.** Основные подходы к дискретизации уравнений движения атмосферы, их преимущества и недостатки. Спектральные, полулагранжевые, конечно-разностные, конечно-элементные и конечно-объемные модели. Модели OpenIFS и MPAS в сравнении с другими моделями глобальной циркуляции.
- 3. Региональное атмосферное моделирование.** Дискретизация уравнений движения атмосферы при региональном моделировании. Особенности моделирования мезомасштабных атмосферных процессов. Модель WRF в сравнении с другими региональными атмосферными моделями.
- 4. Начальные и граничные условия.** Подходы к постановке начальных и граничных условий в глобальных и региональных атмосферных моделях. Основные источники данных наблюдений, используемых для инициализации атмосферных моделей. Понятие об усвоении (ассимиляции) данных, основных методах усвоения данных. Представление об атмосферном реанализе.
- 5. Представление физических процессов в атмосферном моделировании.** Параметризация физических процессов в компьютерных моделях атмосферных процессов, основные классы параметризаций. Подходы к построению схем параметризации подсеточной турбулентности, планетарного пограничного слоя, радиационного переноса в атмосфере, микрофизических процессов, взаимодействия атмосферы с поверхностью. Особенности представления стратосферных процессов и озонового цикла.
- 6. Нелинейная динамика в атмосферном моделировании.** Теория роста ошибок в атмосферных моделях. Роль ошибок в начальных и граничных условиях и неточностей численной модели. Концепция ансамблевого прогнозирования. Построение ансамбля моделей, основные методы внесения возмущений. Интерпретация результатов ансамблевого моделирования.
- 7. Моделирование атмосферных процессов для различных планет земного типа.** Адаптация компьютерных моделей, разработанных для атмосферы Земли, к атмосферам планет земного типа и спутников на примере Марса, Венеры и Титана. Актуальные задачи планетологии и астрофизики, связанные с применением компьютерных моделей атмосферных процессов.
- 8. Перспективы развития компьютерных моделей атмосферных процессов.** Реализация атмосферных моделей на современных суперкомпьютерных системах. Основные направления развития атмосферного моделирования и имеющиеся технические трудности. Использование новых вычислительных архитектур. Перспективы атмосферного моделирования с прямым воспроизведением конвекции в планетарном масштабе и переход к эксафлопс-вычислениям. Баланс между точностью вычислений, сложностью атмосферной модели и доступными вычислительными ресурсами.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<b>1</b>	<b>Задача компьютерного моделирования атмосферных процессов.</b>	<b>4</b>							
<b>1.1</b>	История развития методов атмосферного моделирования и их применения для прогнозирования погоды и климата.	<b>2</b>					[1, доп. 1-2]		
<b>1.2</b>	Современное состояние проблемы. Многообразие исследовательских и прикладных задач, требующих применения компьютерного моделирования атмосферных процессов.	<b>2</b>					[1, 4, 5, 7, 10, доп. 1-3, 5, 8]		
<b>2</b>	<b>Моделирование глобальной циркуляции атмосферы.</b>	<b>4</b>							
<b>2.1</b>	Основные подходы к дискретизации уравнений движения атмосферы, их преимущества и недостатки. Спектральные, полулагранжевые, конечно-разностные, конечно-элементные и конечно-объёмные модели.	<b>2</b>					[1-4, доп. 3-4]		
<b>2.2</b>	Модели OpenIFS и MPAS в сравнении с другими моделями глобальной циркуляции.	<b>2</b>				<b>2</b>	[3-4, доп. 3-4]	Опрос студентов	
<b>3</b>	<b>Региональное атмосферное моделирование.</b>	<b>4</b>							
<b>3.1</b>	Дискретизация уравнений движения атмосферы при региональном моделировании. Особенности моделирования мезомасштабных атмосферных процессов.	<b>2</b>					[1-2, 5-6]		

3.2	Модель WRF в сравнении с другими региональными атмосферными моделями	2					2	[1-2, 5-6]	Опрос студентов
4	<b>Начальные и граничные условия.</b>	4							
4.1	Подходы к постановке начальных и граничных условий в глобальных и региональных атмосферных моделях. Основные источники данных наблюдений, используемых для инициализации атмосферных моделей.	2						[1, 7, доп. 5]	
4.2	Понятие об усвоении (ассимиляции) данных, основных методах усвоения данных. Представление об атмосферном реанализе.	2						[1, 7, доп. 5]	Опрос студентов
5	<b>Представление физических процессов в атмосферном моделировании.</b>	6							
5.1.	Параметризация физических процессов в компьютерных моделях атмосферных процессов, основные классы параметризаций.	2						[1, 3, 5, 6, 8, доп. 3]	
5.2.	Подходы к построению схем параметризации подсеточной турбулентности, планетарного пограничного слоя, взаимодействия атмосферы с поверхностью, микрофизических процессов, радиационного переноса в атмосфере.	2						[1, 3, 5, 6, 8, доп. 3-4]	
5.3.	Особенности представления стратосферных процессов и озонового цикла. Параметризация химических и фотохимических процессов в атмосфере.	2						[1, 3, 5, 6, 8, доп. 3-4]	Письменный коллоквиум
6	<b>Нелинейная динамика в атмосферном моделировании.</b>	4							
6.1.	Теория роста ошибок в атмосферных моделях. Роль ошибок в начальных и граничных условиях и неточностей численной модели. Концепция ансамблевого прогнозирования.	2						[1, 9, доп. 6-7]	
6.2.	Построение ансамбля моделей, основные методы внесения возмущений. Интерпретация результатов ансамблевого моделирования.	2						[1, 9, доп. 6-7]	Защита рефератов
7	<b>Применение атмосферного моделирования для планет земного типа.</b>	2							
7.1.	Адаптация компьютерных моделей, разработанных для	2					2	[10,	Защита



	атмосферы Земли, к атмосферам планет земного типа и спутников на примере Марса, Венеры и Титана. Актуальные задачи планетологии и астрофизики, связанные с применением компьютерных моделей атмосферных процессов.							доп. 8]	рефератов
<b>8</b>	<b>Перспективы развития компьютерных моделей атмосферных процессов.</b>	<b>2</b>							
<b>8.1.</b>	Реализация атмосферных моделей на современных суперкомпьютерных системах. Основные направления развития атмосферного моделирования и имеющиеся технические трудности. Использование новых вычислительных архитектур. Перспективы атмосферного моделирования с прямым воспроизведением конвекции в планетарном масштабе и переход к экзафлопс-вычислениям. Баланс между точностью вычислений, сложностью атмосферной модели и доступными вычислительными ресурсами.	<b>2</b>						[4, доп. 9-10]	Защита рефератов
	<b>Текущая аттестация</b>								Экзамен
	<b>Всего</b>	<b>30</b>						<b>6</b>	

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Рекомендуемая литература

#### *Основная*

1. Kalnay E. – Atmospheric modeling, data assimilation and predictability / Cambridge University Press, 2003. – 369 pp.
2. Мезингер Ф., Аракава А. – Численные методы, используемые в атмосферных моделях / Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 290 с.
3. IFS Documentation CY43R1 (2016), CY40R1 (2014) (<http://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/changes-ecmwf-model/ifs-documentation>)
4. Heinzeller D., Duda M. G., and Kunstmann H. (2016): Towards convection-resolving, global atmospheric simulations with the Model for Prediction Across Scales (MPAS) v3.1: an extreme scaling experiment / Geosci. Model Dev., 9, 77-110, doi:[10.5194/gmd-9-77-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-77-2016)
5. Pielke R.A., Sr. – Mesoscale Meteorological Modeling / Academic Press, 2002. – 693 pp.
6. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, J.G. Powers // NCAR Technical Note. – 2008. – NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi:[10.5065/D68S4MVH](https://doi.org/10.5065/D68S4MVH)
7. Lahoz, W. and Schneider, P. (2014). Data assimilation: making sense of Earth Observation / Frontiers in Environmental Science, Vol. 2, Article 16, May 2014. doi: [10.3389/fenvs.2014.00016](https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00016)
8. Stensrud D.J. – Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models / Cambridge University Press, 2007. – 480 pp.
9. Palmer, T., & Hagedorn, R. (Eds.). – Predictability of Weather and Climate / Cambridge University Press, 2006. – 734 pp. doi:[10.1017/CBO9780511617652](https://doi.org/10.1017/CBO9780511617652)
10. Richardson, M. I., A. D. Toigo, and C. E. Newman (2007), PlanetWRF: A general purpose, local to global numerical model for planetary atmospheric and climate dynamics, J. Geophys. Res., 112, E09001. doi:[10.1029/2006JE002825](https://doi.org/10.1029/2006JE002825)

#### *Дополнительная*

1. Bauer, P., Thorpe, A. and Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. Nature, 525(7567), pp.47-55. doi: [10.1038/nature14956](https://doi.org/10.1038/nature14956)
2. Harper K. – Weather by the numbers: The genesis of modern meteorology / Cambridge, Mass: The MIT Press, 2012. – 320pp.
3. В.Н. Лыкосов, А.В. Глазунов, Д.В. Кулямин, Е.В. Мортиков, В.М. Степаненко. – Суперкомпьютерное моделирование в физике

- климатической системы: учебное пособие // М.: Изд.-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012, 408 с.
4. Володин Е.М. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы – Курс лекций / ИВМ РАН, 2007. – 89 стр.
  5. Dee, D., Balmaseda, M., Balsamo, G., Engelen, R., Simmons, A. and Thépaud, J. (2014). Toward a Consistent Reanalysis of the Climate System / Bulletin of the American Meteorological Society, 95(8), pp.1235-1248. doi: [10.1175/BAMS-D-13-00043.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00043.1)
  6. Buizza R., Leutbecher M. – The Forecast Skill Horizon, ECMWF Research Department Technical Memorandum 754, 2015. (also published as: Buizza, R. and Leutbecher, M. (2015), The forecast skill horizon. Q.J.R. Meteorol. Soc., 141: 3366–3382. doi:[10.1002/qj.2619](https://doi.org/10.1002/qj.2619)).
  7. Дымников В.П. Устойчивость и предсказуемость крупномасштабных атмосферных процессов / М.: ИВМ РАН, 2007. – 283 стр.
  8. Toigo, A., Lee, C., Newman, C., & Richardson, M. (2012). The impact of resolution on the dynamics of the Martian global atmosphere: Varying resolution studies with the MarsWRF GCM. Icarus, 221(1), 276-288. doi:[10.1016/j.icarus.2012.07.020](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.07.020)
  9. Silva, J. P., Hagopian, J., Burdiat, M., Dufrechou, E., Pedemonte, M., Gutiérrez, A., Cazes G., Ezzatti, P. (2014). Another step to the full GPU implementation of the Weather Research and Forecasting model. The Journal of Supercomputing, 70(2), 746-755. doi: [10.1007/s11227-014-1193-y](https://doi.org/10.1007/s11227-014-1193-y)
  10. Thornes, T., Düben, P. and Palmer, T. (2017), On the use of scale-dependent precision in Earth System modelling. Q.J.R. Meteorol. Soc, 143: 897–908. doi: [10.1002/qj.2974](https://doi.org/10.1002/qj.2974)

## **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

1. Опрос студентов.
2. Письменные коллоквиумы (контрольные работы).
3. Реферативные работы.

### **Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине**

#### *Рекомендуемые темы реферативных работ*

1. Динамический хаос и пределы предсказуемости погоды и климата
2. Мультифрактальный анализ в исследовании атмосферной динамики
3. Атмосферное моделирование в планетологии и астрофизике: газовые гиганты и их спутники, объекты пояса Койпера, планеты земного типа, экзопланеты.
4. Перспективы использования новых программных и аппаратных архитектур в развитии компьютерного моделирования атмосферных процессов

#### *Рекомендуемые темы коллоквиумов*

1. Представление физических процессов в атмосферных моделях. Схемы параметризации.

### **Методика формирования итоговой оценки**

Итоговая оценка выставляется с учетом:

1. Правил проведения аттестации, утвержденных постановлением Министерства образования Республики Беларусь № 33 от 29 мая 2012 г.
2. Положения о рейтинговой системе БГУ (редакция 2015 г.).
3. Критериев оценки студентов (10 баллов).

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Оптика	Кафедра общей физики	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол № 11 от 20.04.2017
Термодинамика и статистическая физика	Кафедра теоретической физики и астрофизики	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол № 11 от 20.04.2017
Физика атмосферы и гидросферы	Кафедра физической информатики и атомно-молекулярной физики	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол № 11 от 20.04.2017
Компьютерное моделирование распределённых физических систем	Кафедра физической информатики и атомно-молекулярной физики	Нет изменений	Вносить изменения не требуется. Протокол № 11 от 20.04.2017

