

**ДИАГНОЗ и ПРОГНОЗ
ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ
и ЭКОСИСТЕМ
ВЕЛИКИХ ОЗЕР РОССИИ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН

**ДИАГНОЗ и ПРОГНОЗ
ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ
и ЭКОСИСТЕМ
ВЕЛИКИХ ОЗЕР РОССИИ**

Под редакцией чл.-корр. РАН Н.Н. Филатова

Петрозаводск
2020

УДК 556.555.4 + 556.556 : 556.5.072(470)

ББК 26.222.6

Д44

Рецензенты:

д.ф.-м.н., профессор **В. Н. Зырянов**, д.б.н., профессор **Н. М. Калинкина**

Д44 **Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России** : [коллективная монография] / под ред. Н. Н. Филатова. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2020. – 255 с. : 133 ил., 26 табл. Библиогр. 316 назв.

ISBN 978-5-9274-0866-5

Ключевые слова: *крупные озера, термогидродинамика, экосистемы, эвтрофирование, диагноз, прогноз, антропогенное воздействие, климатические изменения, математические модели.*

Представлены результаты исследований состояния и изменений термогидродинамических процессов и экосистем крупнейших озер России (Ладожского, Онежского, Каспия и Байкал). Даны оценки изменчивости регионального климата, гидрологических характеристик, элементов водного баланса и уровня воды озер по данным длительных измерений и математического моделирования. С использованием моделей и анализа данных длительных наблюдений выполнены диагностические и прогностические расчеты атмосферного транспорта тепла и влаги на водосборы исследованных озер. Получены оценки возможных изменений гидрологического режима и уровня воды озер до 2085 г. Реализована динамико-стохастическая (ДС) модель многолетнего уровня озера оз. Байкал с многокомпонентным входным процессом. Разработана вихререзающая модель трехмерной циркуляции Каспия, предназначенная для исследования изменчивости его уровня и термохалинных полей от синоптического до климатического масштабов. Особое внимание уделено расчету водного и теплового балансов Каспия в случае больших колебаний его уровня. Проведены исследования по диагнозу и прогнозу изменения экосистем (гидрофизических процессов, первичной продукции, биогеохимических потоков вещества) Ладожского и Онежского озер с использованием созданных (или/и адаптированных) 3-D математических моделей. Даны рекомендации по использованию результатов исследований.

УДК 556.555.4 + 556.556 : 556.5.072(470)

ББК 26.222.6



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 19-15-00022, не подлежит продаже

Reviewers:

DSc (physics&mathematic), professor **V. N. Zyryanov**, DSc (Biol.), professor **N. M. Kalinkina**

Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems great lakes of Russia : [book] / Filatov N. N. (Editor). – Petrozavodsk : KRC RAS, 2020. – 255 p. : 133 fig., 26 tabl. 316 references.

Keywords: *large lakes, hydrodynamics, ecosystems, eutrophication, diagnosis, prediction, anthropogenic impact, climatic changes, mathematical models.*

The results of system studies of the state and changes in thermo-hydrodynamic processes and ecosystems of Russian's largest lakes (Ladoga, Onego, Caspian and Baikal) are presented. Estimates of the regional climate variability, hydrological characteristics, water balance elements and water level variations are given using long-term measurements and mathematical modeling. Diagnostic and forecasting calculations of atmospheric heat and moisture transport to the watershed of the studied lakes were performed with using the models and created databases. Estimates of possible changes in the lake water level up to 2085 are given. A dynamic-stochastic (DS) model of the Baikal multi-year water level regime with a multicomponent input process is implemented, which is based on the idea of level fluctuations as the output process of the hydrological system, the input of which receives the main components of the lake. Three-dimensional eddy-resolution model of the Caspian Sea circulation has been developed, designed to study the variability of its level and thermohaline fields: from synoptic to climatic scales. It were pay attention to developing of the calculation's model, of the water and moisture balances of the sea in case of large water level fluctuations. Diagnostic and prognostic studies of the lake's ecosystems (hydrophysical processes, primary production, biogeochemical flows of matter) of Lakes Ladoga and Onego were carried out using the created or adapted 3-D mathematical models developed in our country. Recommendations on the use of research results are presented.

ISBN 978-5-9274-0866-5

© Коллектив авторов, 2020

© Российский фонд фундаментальных исследований, 2020

© Российский научный фонд, 2020

© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2020

© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ (Филатов Н. Н.)	5
1 ТЕРМОГИДРОДИНАМИКА И ЭКОСИСТЕМЫ ВЕЛИКИХ ОЗЕР РОССИИ: ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ (Филатов Н. Н.)	8
2 ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЗЕР	21
2.1 Данные и информационная система (Баклагин В. Н., Богданова М. С., Выручалкина Т. Ю., Филатов Н. Н.)	21
2.2 Изменчивость климата на водосборах великих озер России (Выручалкина Т. Ю., Панин Г. Н.)	32
2.2.1 Изменчивость климата Европейской части России	33
2.2.2 Изменчивость климата на водосборе Каспия	39
2.2.3 Изменчивость атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ) и индексы атмосферной циркуляции	46
2.3 Внутривековая изменчивость гидрологических характеристик озер	53
2.3.1 Изменчивость температуры воды и характеристик ледяного покрова Ладожского и Онежского озер (Филатов Н. Н., Баклагин В. Н., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И.)	53
2.3.2 Изменчивость элементов водного баланса Ладожского и Онежского озер (Балаганский А. Ф., Махальская Н. И., Филатов Н. Н.)	67
2.3.3 Изменчивость водного баланса оз. Байкал (Выручалкина Т. Ю., Фролов А. В.)	78
2.3.4 Внутривековая изменчивость уровня воды великих озер России (Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Назарова Л. Е.)	85
2.3.5 Внутривековая изменчивость уровня воды великих озер Евразии и Северной Америки (Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Назарова Л. Е.)	96
3 ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ (РЕТРОСПЕКТИВНЫЕ) РАСЧЕТЫ ОЦЕНКИ АТМОСФЕРНОГО ТРАНСПОРТА ВЛАГИ И ЕГО ПРИПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА НА ВОДОСБОРАХ ОЗЕР ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА (1948–2016) (Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А.)	100
3.1 Каспий	103
3.2 Ладожское и Онежское	111
3.3 Байкал	116
4 ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ АТМОСФЕРНОГО ТРАНСПОРТА ВЛАГИ И ПРИПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА ВЛАГИ НА ВОДОСБОРАХ ОЗЕР (Выручалкина Т. Ю., Дианский Н. А., Гусев А. В., Панин Г. Н., Фомин В. В.)	121
4.1 Каспий	122
4.2 Ладожское и Онежское	124
4.3 Байкал	126
5 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА (СОДИП) ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСПИЯ (Дианский Н. А., Фомин В. В., Выручалкина Т. Ю., Коршенко Е. А.)	128

5.1	Описание системы оперативного диагноза и прогноза	129
5.2	Верификация системы оперативного диагноза и прогноза при проведении ретроспективных расчетов	130
5.3	Верификация системы оперативного диагноза и прогноза при проведении прогностических расчетов	136
6	ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ УРОВНЯ КАСПИЯ (Ибраев Р. А., Дьяконов Г. С.)	153
6.1	Постановка задачи	153
6.2	Гидродинамическая модель Каспия высокого разрешения	155
6.3	Реконструкция изменчивости уровня Каспия в 1958–2001 гг.	157
6.3.1	Внешнее воздействие	157
6.3.2	Начальные условия и «разгон» модели	158
6.3.3	Результаты расчетов	158
6.4	Чувствительность многолетних трендов уровня Каспия	160
6.4.1	Чувствительность к ошибкам атмосферного форсинга	160
6.4.2	Чувствительность к вариациям потоков воды и площади зеркала моря	163
7	МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭКОСИСТЕМ ЛАДОЖСКОГО И ОНЕЖСКОГО ОЗЕР ПРИ АНТРОПОГЕННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	166
7.1	Моделирование термогидродинамических процессов и экосистем Ладожского и Онежского озер на основе 3-D модели гидродинамики внутреннего моря (МГВМ) (Голосов С. Д., Зверев И. С., Шитунова Е. А.)	166
7.1.1	Описание 3-D модели и ее адаптация к пресным водоемам	166
7.1.2	Верификация МГВМ по данным наблюдений на Ладожском озере	171
7.1.3	Результаты моделирования термического, ледового режима и экосистемы Ладожского озера при изменениях климата	176
7.1.4	Результаты моделирования термического, ледового режима и экосистемы Онежского озера при изменениях климата	185
7.2	Диагноз состояния экосистемы Ладожского озера и прогноз изменений при возможном изменении климата на основе математического моделирования биогеохимических потоков вещества (Исаев А. В., Савчук О. П.)	197
7.3	Применение метода клеточных автоматов (КА) для моделирования гидрофизических процессов, распространения примесей и экосистем Ладожского и Онежского озер (Меншуткин В. В., Филатов Н. Н.)	209
7.3.1	Моделирование гидрофизических процессов, распространения примесей Ладожского озера	211
7.3.2	Моделирование экосистемы Онежского озера подо льдом	219
	ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ (Филатов Н. Н., Выручалкина Т. Ю., Голосов С. Д., Дианский Н. А., Зверев И. С., Ибраев Р. А., Исаев А. В., Меншуткин В. В., Савчук О. П.)	228
	ЛИТЕРАТУРА	235
	ПРИЛОЖЕНИЕ	252