

**ДИАГНОЗ И ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И
ЭКОСИСТЕМ КРУПНЫХ ОЗЕР
ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ²**

Филатов Н.Н.¹, Панин Г.Н.², Дианский Н.А.³, Ибраев Р.А.³,
Баклагин В.Н.¹, Выручалкина Т.Ю.², Гусев А.В.³, Назарова Л.Е.¹,
Соломонова И.В.², Фомин В.В.³

¹Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

²Институт водных проблем РАН, г. Москва

³Институт вычислительной математики РАН, г. Москва
nfilatov@rambler.ru

Введение. Представлены результаты совместных исследований ИВПС КарНЦ, ИВМ РАН и ИВП РАН по диагнозу и прогнозу изменения гидрологического режима и экосистем крупнейших озер России (Ладожского, Онежского и Каспийского моря-озера), имеющих стратегическое значение для развития экономики России. Важность сохранения и восстановления ресурсов этих водных объектов были объявлены в Решении Совета Безопасности РФ 20.11.2013 г. «о необходимости разработки закона об охране ресурсов Ладожского и Онежского озер». На Саммите Каспийских государств в ноябре 2014 г., отмечена ключевая роль гидрометеорологического обеспечения исследований Каспийского моря. Поэтому обоснование методов диагноза и прогноза состояния исследуемых озер при разном комплексе условий – важная научная и практическая проблема. Были выявлены особенности изменений элементов водного баланса, уровня исследуемых водоемов за период инструментальных измерений (XIX-XXI века). На основе выявленных закономерностей поставлена задача: оценить взаимосвязи гидрологического режима и экосистем Ладожского, Онежского озер и Каспийского моря с климатическими изменениями и разработать оценочный прогноз изменения их экосистем на ближайшие десятилетия.

Реализация поставленных задач диагноза и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем для указанных крупных озер под влиянием антропогенных факторов и климата представлена на рис. 1.

²Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-17-00740).

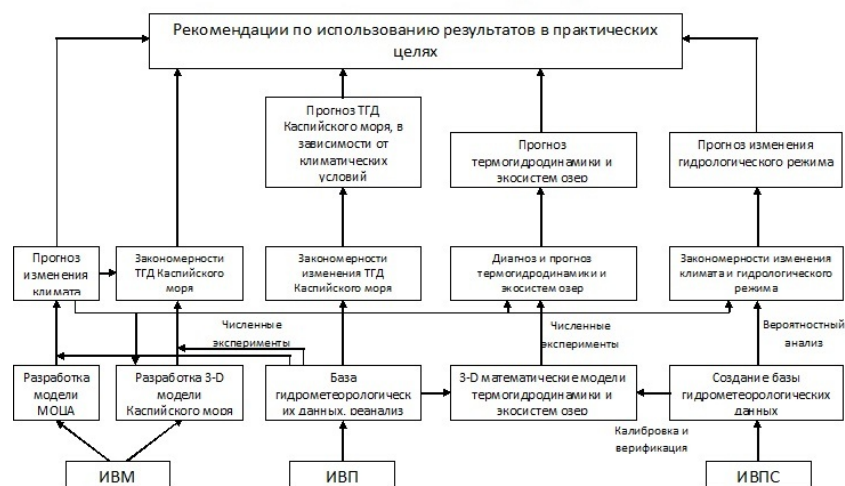


Рис. 1 – Алгоритм реализации диагноза и прогноза изменения гидрологического режима и экосистем крупных озер под влиянием антропогенных факторов и климата

Результаты. По данным длительных наблюдений изучены закономерности изменений климата на водосборе, а также гидрологического режима Ладожского, Онежского озер и Каспийского моря-озера. Особое внимание уделено оценке реакции гидрологического режима озерных систем на климатические изменения. Выполнен вероятностный анализ данных длительных рядов гидрометеорологических наблюдений, который дает возможность выявить закономерности изменения климата в регионе, оценить трендовую составляющую, определить доминирующие циклические изменения климата, элементов водного баланса во временных масштабах от месяцев до внутривековых колебаний. Полученные данные использовались для калибровки, верификации 3-D моделей термодинамики (ТНД) [1-4] и более совершенной модели термодинамики (ТГД), разработанной в Институте вычислительной математики РАН [5]. С использованием разработанных моделей будут даны прогнозы изменений гидрологического режима и экосистем озер при разном комплексе условий.

Анализ данных изменений климата на водосборе Ладожского и Онежского озер показал, что в течение XX и первого десятилетия XXI веков в целом отмечается положительная тенденция изменения

средней годовой температуры воздуха [6, 7]. На рис. 2 показаны изменения уровня воды этих озер за период 1880–2014 гг.

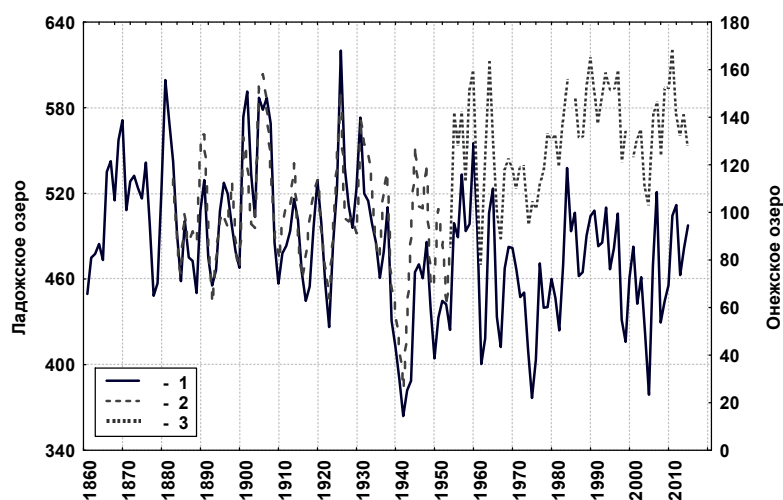


Рис.2 – Уровни воды (см) в Ладожском (1) и Онежском озерах (2 - до и 3 - после зарегулирования) по данным за 1860-2014 гг.

По результатам вероятностного анализа данных за указанный период выявлены квазициклические колебания уровня с временными масштабами около 60-ти, 11-ти, 5-ти и 2-х лет.

В связи с возросшим интересом к объяснению внутри- и межгодовой изменчивости ледового режима крупнейших озер Европы, поставлена задача исследования связи основных характеристик гидрологического режима Ладожского, Онежского озер и Каспийского моря с различными атмосферными процессами.

Значительно сложнее оказалась задача диагноза и прогноза изменений уровня Каспия. Согласно ранее проведенным исследованиям уровня Каспийского моря [8] после 1995 г. он должен понижаться, хотя в работах [9, 10] прогнозировался подъем уровня моря в этот же период. Однако данные наблюдений свидетельствуют о более сложных изменениях уровня моря. Прогнозирование уровня Каспия, основанное на работе [11] не было успешным. В [12] предлагалось учитывать нелинейность отклика испарения с поверхности моря системы. В монографии [13] предлагается так называемый адаптивный подход при прогнозировании уровня моря, учитывающий происходящие и уточняющие перспективные изменения параметров природных и антропогенных процессов.

Было показано, что использование моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) на региональном уровне также часто приводит к противоречивым результатам. Например, в работе [14] проанализированы изменения в гидрологическом цикле нескольких бассейнов, включая Каспийское море. Отмечалось увеличение атмосферных осадков и поверхностного стока и подъем уровня Каспийского моря в XXI в., хотя позднее эти же авторы, используя три модели МОЦАО, прогнозировали постоянство уровня моря вплоть до окончания XXI века. Исследования этого региона, выполненные в [15] для разных сценариев IPCC (A2 и A1b) показали, что в течение XXI в. наоборот, ожидается устойчивое снижение уровня Каспийского моря. Исследования [16] с помощью семи моделей (IPCC) показали, что уровень моря в XXI веке не будет значимо изменяться. Использование МОЦАО на региональном уровне требует особой тщательности, так как зачастую приводит к противоречивым результатам. Вероятно, одна из причин отмеченных противоречий связана с использованием разных параметризаций для испарения, поэтому в наших исследованиях уделено специальное внимание этому вопросу.

Развиваются модели параметризации поверхностных потоков и, в частности, испарения, как с водной поверхности, так и с суши [17]. Решение поставленной задачи проводится как в рамках совместного анализа уравнений водного баланса моря и баланса влаги региона, включающего конкретный водоем и его бассейн, так и путем проведения экспериментов с помощью модели общей циркуляции атмосферы и океана, разработанной в ИВМ РАН [18] с целью исследования влияния Атлантического океана на формирование климатической изменчивости озер Европейской территории РФ. При этом используются индексы Североатлантического колебания (САК), Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), Арктического колебания (АО), транспорт влаги с Северной Атлантики на Евразию в результате западного переноса и др.

В процессе исследований применялось несколько видов реанализов NCEP, ERA-Interim, CORE, а также результаты моделирования по воспроизведению современного климата и океанической циркуляции на моделях ИВМ РАН [19]. В качестве основных индикаторов климатических изменений, влияющих на изменение уровня водоемов, используются индексы Североатлантического колебания

(САК), Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции (АТХЦ), испарения и влажности над Северной Атлантикой. Необходимость привлечения климатических изменений в регионе Северной Атлантики обусловлена тем, что до сих пор без этого не удавалось получить физически полное объяснение причин изменения уровня крупных озер, включая Каспийское море, Ладожское и Онежское озера, и, следовательно, сформировать его прогноз.

Расчет среднего уровня Каспийского моря проводился по 4-м постам: г. Махачкала, г. Баку, г. Красноводск и п. Форт-Шевченко. Режим уровня Каспийского моря за период 1837-2013 гг. представлен на рис. 3.

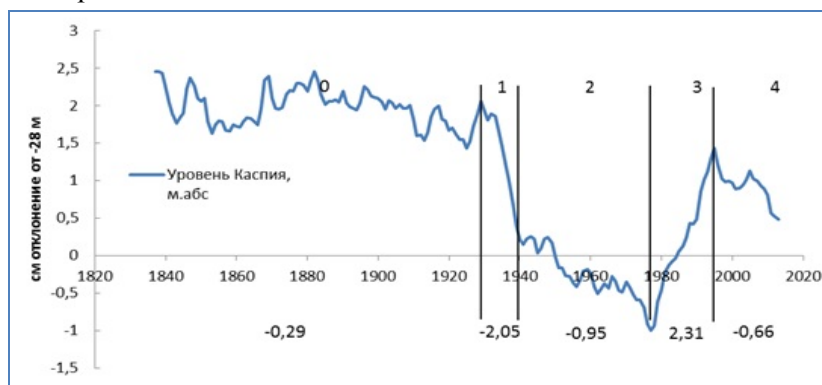


Рис. 3 – Изменения уровня Каспийского моря-озера за 1840-2013 гг.

Последние десять лет уровень моря как и Ладожского и Онежского озер, заметно падал (см. рис. 2). Корреляционный анализ показал, что значимые связи между среднегодовым уровнем Каспийского моря и индексами атмосферной циркуляции отмечаются только для East Atlantic Pattern (EA).

Для поставленных в проекте задач сравнивались несколько баз данных (БД) реанализа: CORE (Datasets for Common Ocean-ice Reference experiments, NCEP/NCAR и Era-interim. БД CORE и NCEP/NCAR имеют период с 1948 по 2009 гг., Era-interim – с 1979 по 2009 гг. Сравнение рядов данных подтверждает синхронность их межгодовых колебаний. Наилучшее соответствие из всех рассмотренных БД дает база Era – interim, очевидно из-за более мелкой сетки. Существенный минус данной базы – это короткий период наблюдений (1979–2013 гг.), по сравнению с другими БД, имеющими

период с 1948 г. Поскольку для решения дальнейших задач по проекту необходим период наблюдений минимум 60 лет, предполагается использовать данные CORE, так как в рассматриваемом регионе они лучше соответствуют натурным данным, чем БД NCEP/NCAR.

В рамках проекта выполнена постановка эксперимента по реконструкции климата Каспийского моря во второй половине XX века и проведена верификация и корректировка входных и начальных данных; подготовлен эксперимент по воспроизведению циркуляции Каспийского моря в 1958-2001 гг. [20]. Проанализированы данные о состоянии приповерхностного слоя атмосферы ECMWF ERA 40, уточнены коэффициенты коррекции полей ERA 40, сформирован входной файл с атмосферным форсингом; выполнены предварительные расчеты модели динамики океана Сигма-Z-КОМПАС, использующей по вертикали гибридную координату [20].

Важным этапом исследований по проекту является воспроизведение циркуляции Мирового океана с помощью МОЦО для оценки климатической изменчивости характеристик АТХЦ, которая участвует в формировании меридионального переноса тепла в высокие широты Северного полушария и тем самым воздействует на климат Евразии. Приведем результаты, полученные при воспроизведении циркуляции Мирового океана с помощью МОЦО INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [19]. Эта модель ИВМ РАН участвует в программе МГЭИК по прогнозированию изменений климата. Сценарий эксперимента был взят в соответствии с международной программой CORE (Coordinated Ocean-ice Reference Experiments) II по воспроизведению циркуляции Мирового океана. Результаты расчетов показывают хорошее совпадение модельных и наблюдаемых значений индекса АМО, что позволяет их использовать для оценки климатической изменчивости циркуляции Северной Атлантики. Начавшееся снижение интенсивности АТХЦ в начале XXI века может способствовать возможному грядущему похолоданию в западной Арктике. Корреляции между зимними значениями температуры воздуха и зимними значениями индекса САК и зоны их распространения при разных тенденциях в изменении индексов АТХЦ и МПТ также свидетельствуют о непосредственном влиянии последних на вариации климата Евразии и ход уровня Каспийского моря. Действительно, увеличение зоны воздействия САК на Европейскую территорию России (ЕТР) в период с 70-ых

по 90-ые годы XX века согласуется с активизацией индексов АТХЦ и МПТ, увеличением стока р. Волги и ростом уровня моря. Падение уровня моря согласуется со снижением зоны воздействия САК на ЕТР, снижением стока р. Волги и снижением индексов АТХЦ и МПТ в период с 50-х по 70-е годы XX века и в начале XXI века, соответственно.

Литература

1. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) // Водные ресурсы, т. 40, № 6. 2013. С.1-17.
2. Менишуткин В.В., Л.А. Руховец, Н.Н. Филатов. Состояние и перспективы развития моделирования экосистемы пресноводных озер. Использование моделей для решения задач сохранения водных ресурсов. СПб.: Нестор-История, 2014. 120 с.
3. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Моделирование экосистем пресноводных озер (обзор) 2. Модели экосистем пресноводных озер // Водные ресурсы, Том 41, № 1, 2014, С. 24-38.
4. Менишуткин В.В., Руховец Л.А., Филатов Н.Н. Математические модели водных экосистем в задачах управления ресурсами озер.// Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 3. 2014. С. 100-108.
5. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. Российская акад. наук, Ин-т вычислительной математики, Российский фонд фундаментальных исследований. Москва, 2008.
6. Ладога // Под. ред. В.А. Румянцева, С.А. Кондратьева. СПб.: Нестор-История, 2013. 468 с.
7. Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Влияние изменений климата на экосистемы озер севера Европейской территории России.// Ученые записки РГТМУ. № 34. СПб. 2014. С. 48-55.
8. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря// Водные ресурсы, 1994, №4, С. 389-404.
9. Голицын Г.С. др. О современном подъеме уровня Каспийского моря// Водные ресурсы .1998. Т.25. №2. С. 133-139.
10. Казанский А.Б. Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря// Доклады РАН. 1994. Т .338. №4. С.531.

11. Будыко М.И., Ефимова Н.А., Лобанов В.В. Будущий уровень Каспийского моря. // Метеорология и гидрология. №5.1988. С. 86-94.
12. Хубларян М.Г., Найденов В.И. Нелинейная теория колебаний уровня природных водоемов // В кн.: Воды суши: проблемы и решения. М.: ИВП РАН, 1994. С.193-216.
13. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. – М.: Геос. 2003.170 с.
14. Arpe, K. and E. Roeckner. Climate simulations: Impacts of increased greenhouse gases for Europe. *Advances in Water Resources*, 23, 1999. 105-119.
15. Elguindi, N, and Giorgi, F. Projected changes in the Caspian Sea level for the 21st century based on the latest AOGCM simulations. *Geophysical Research Letters* 33: 2006. doi: 10.1029/2006GL025943. issn: 0094-8276.
16. Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. 2008. № 6. С. 5-19.
17. Панин Г.Н., Соломонова Т.Ю., Выручалкина И.В. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // Водные ресурсы. Т. 41. № 5. 2014. С. 488-495.
18. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX-XXI веках с помощью модели земной климатической системы ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 379-400.
19. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведения циркуляции Мирового океана и её климатической изменчивости в 1948-2007 гг. // Физика атмосферы и океана. Т.50. №1. 2014 . С. 3-15.
20. Калмыков В.В., Ибраев Р.А. Программный комплекс совместного моделирования системы океан-лед-атмосфера-почва на массивно-параллельных компьютерах // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2013. Т. 14. № 2 (28). С. 88-95.