

## **Вторые научные чтения «Статистическая климатология и мониторинг климата», посвященные памяти профессора Георгия Вадимовича Грузы**

### **ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В России в системе Росгидромета создана и действует научно-обоснованная система мониторинга климата. Источниками информации для нее служат, прежде всего, данные станционных наблюдений, а также реанализов, математического моделирования земной системы и дистанционного зондирования. Эта информация аккумулируется в базе данных с использованием средств их усвоения и далее обрабатывается средствами расчета характеристик объектов мониторинга и подготовки выходных материалов.

В настоящее время в состав выходной продукции мониторинга климата входят: сезонные и годовые бюллетени изменения климата (России, СНГ, земного шара); ежемесячные экспресс-бюллетени; бюллетень характеристик циклонической и антициклонической активности; бюллетень экстремумов температуры на территории России; ежегодный Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации; Сводное ежегодное сообщение о состоянии и изменении климата на территории государств-участников СНГ.

Базовым массивом для глобальной оценки температурных условий на суше служит массив данных станционных наблюдений 3288 наземных гидрометеорологических станций. Данные этого массива, приведенные к соответствующему пространственному масштабу, хорошо согласуются с данными массива CRUTEM5, широко используемого в научных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК).

Анализ данных мониторинга климата показывает, в частности, что средняя глобальная температура в приповерхностном слое в 1976–2025 гг. увеличивалась со скоростью примерно  $0.2^{\circ}\text{C}/10$  лет, т.е. современное глобальное потепление – реальность.

2. В современном понимании мониторинг климата должен предоставлять не только гидрометеорологическую информацию, но и данные, характеризующие все основные климатообразующие компоненты земной системы. Это предъявляет серьезные требования к развитию инструментальной базы мониторинга и методикам измерений. При этом, наряду с методами станционных наблюдений, большое значение имеют дистанционные методы измерения климатообразующих факторов и климатических характеристик. Методы измерения содержания в атмосфере парниковых газов на основе ИК Фурье-спектроскопии, стратосферного аэрозоля с помощью

лидарного зондирования, поля ветра в свободной атмосфере по спутниковым данным дают ценную информацию об изменчивости климатических параметров и определяющих их факторах.

Важное значение приобрел вопрос устойчивой работы имеющихся в системе Росгидромета в настоящее время наземных станций мониторинга, а также станций дистанционного мониторинга содержания парниковых газов и станций лидарного зондирования атмосферы, расположенных в различных географических зонах России. Эти станции используют отечественную измерительную аппаратуру.

Представляется, что при дальнейшем развитии сетей мониторинга целесообразно развивать имеющиеся и организовывать новые мощные универсальные наземные станции в различных географических зонах. Измерения на этих станциях будут дополняться спутниковыми измерениями. Они будут давать представление о полях гидрометеорологических переменных и составляющих атмосферы. Результаты этих измерений будут калиброваться и корректироваться с использованием данных наземных станций.

3. Современные изменения климата проявляются не только в увеличении или же уменьшении средних значений гидрометеорологических переменных, но и в изменении экстремальных значений – их частоты, интенсивности, временных и пространственных масштабов. В связи с этим наряду с традиционными для климатологии методами статистики – анализом изменений моментов гидрометеорологических переменных первого и второго порядка – нужна дальнейшая детализация. Необходимо также оценивать моменты высших порядков, квантили, изменения плотности распределений в целом, нужно использовать непараметрические методы статистики. Такая детализация актуальна для работы как с приземными данными, так и с данными радиозондирования и дистанционного зондирования. Возможно, что при статистическом прогнозировании экстремумов в меняющемся климате (с расчетом модификации функции распределения вероятностей – ФРВ) более перспективно использование среднемесячных значений температуры и месячных сумм осадков. Для них теоретическая модель ФРВ описывает весь диапазон аномалий, в то время как при использовании, например, суточных сумм осадков самые большие аномалии перестают подчиняться ФРВ, общей для остальных, меньших членов выборки.

4. Дальнейшего развития требует также методология выделения трендов во временных рядах гидрометеорологических данных. Долговременные, с доиндустриального времени, тренды

гидрометеорологических параметров очевидно не линейны. Для получения их более реалистичных оценок возможно использование непрерывных кусочно-линейных функций, обеспечивающих (при соблюдении баланса между смещением и вариацией статистической модели и недопущении переобучения) минимум суммы квадратов отклонений от имеющихся данных наблюдений.

5. Важным для мониторинга климата методологическим достижением является использование результатов математического моделирования климата, климатической системы и земной системы в целом. В настоящее время в распоряжении специалистов в области статистической климатологии и мониторинга климата имеются не только данные станционных наблюдений, но и массивы реанализов для многих составляющих климатической системы Земли, созданные с использованием климатических моделей. Они дали возможность заполнять лакуны в данных, оставшиеся в некоторых регионах для некоторых периодов времени. Это помогает не только выполнять обработку и интерпретацию данных мониторинга, но и позволяет проводить исследования, открывающие новые механизмы изменчивости климата. Среди российских климатических моделей упомянем глобальную модель Института вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (входит в группу моделей международного проекта CMIP – Coupled Model Intercomparison Project), глобальную модель Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и региональную климатическую модель Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Эти учреждения нуждаются в развитии своей вычислительной базы.

6. Использование региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова позволило, кроме получения многочисленных важных результатов о будущих климатах, проанализировать характеристики редких экстремумов температуры воздуха заданного периода осреднения. Продемонстрированы важные региональные различия в чувствительности показателей экстремальности к изменениям климата, что существенно для оценки рисков критических воздействий и разработки стратегий адаптации.

7. Имеющиеся данные мониторинга климата и возможности математического моделирования климата позволили эффективно анализировать и проводить атрибуцию климатических тенденций некоторых экстремальных погодных аномалий. Так, данные мониторинга и реанализа ERA5 позволили проанализировать волны жары и экстремальные осадки на территории России. Обнаружено,

что в условиях роста глобальной и региональной температуры возможно не только увеличение, но и снижение экстремальности погодных аномалий.

При анализе региональных особенностей изменения климата России показано, что в последние десятилетия в большинстве российских регионов происходит снижение изменчивости температуры в следующих временных диапазонах: межсуточном, синоптическом и диапазоне устойчивых погодных режимов. Для давления также преобладают регионы со снижением изменчивости, в том числе это происходит на европейской части России. Исследование связи интенсивности сильных осадков с температурой выявило уменьшение интенсивности с ростом температуры в летний сезон при превышении определенного температурного порога (около 20–25 градусов). Это может быть связано с недостатком влаги при быстром росте влагоемкости атмосферы при потеплении. На черноморском побережье Кавказа, несмотря на рост температуры воздуха и температуры поверхности Черного моря, в последние 50 лет отсутствуют тенденции к росту средних сумм и экстремальных значений осадков в летний сезон. Такой результат может быть связан с ростом атмосферного давления и дивергенции влаги в регионе. Вместе с тем, в Сочи выявлен рост интенсивности 10-минутных осадков с ростом температуры при снижении интенсивности часовых, 12-часовых и суточных осадков. Показано, что в разные периоды волны жары 2010 года на европейской части России роль радиационных факторов была различна. Если в начальный период основное значение имела положительная аномалия нисходящей солнечной радиации, а также рост явного потока тепла из-за высыхания почвы, то далее важную роль играл возросший поток длинноволнового противоизлучения атмосферы. В достижении максимумов температуры в конце июля и начале августа главную роль играла адвекция сухого и теплого воздуха с юго-востока.

8. Данные мониторинга климата в Арктике, включающие результаты наблюдений за состоянием атмосферы, морских льдов и океана, и глобальные данные атмосферных и океанических реанализов позволили установить существенный вклад притоков тепла и влаги из более низких широт в формирование изменений климата Арктики и их усиление по сравнению с низкими и умеренными широтами Северного полушария.

9. Проблема наблюдаемого изменения уровня Каспийского моря имеет не только фундаментальное значение, но и огромное прикладное значение вследствие значительных последствий этого процесса для прибрежных естественных и антропогенных систем.

Выполненный совместный анализ данных мониторинга уровня Каспийского моря и залива Кара-Богаз-Гол, связанных проливом, показал, что в последние 5 лет (2020–2024 гг.) уровни этих водоёмов снижались со значительно большей скоростью (22.7 и 37.3 см/год соответственно), чем в предшествующий период 2005–2019 гг. (8.16 и 12.2 см/год соответственно).

Исследования последних лет показали, что изучение корреляции уровня моря с каким-либо одним фактором формирования водного баланса Каспия, например, со стоком Волги, недостаточно для понимания динамики изменения уровня моря. Важную роль играют также процессы испарения и адвекции влаги над поверхностью моря и прилегающих участках суши.

Вертикально проинтегрированный перенос влаги хорошо согласуется с эффективным испарением в данном регионе, что позволяет использовать его для анализа атмосферной части баланса влаги. Анализ вертикальной структуры переноса влаги наряду с анализом конвективной и адвективной компонент влагопереноса подтверждают существенную роль влияния изменений атмосферной циркуляции, особенно в Северной части Каспийского моря, на наблюдаемые изменения уровня моря.

Конечно, резкое уменьшение стока Волги в 2021–2024 гг. (годовой сток был примерно 207-212 км<sup>3</sup>) внесло свой вклад в более интенсивное снижение уровня моря. Но главным фактором снижения уровня явилось увеличение испарения. Для 2023 г. оценка годового испарения составила примерно 124.6 см. Это выше среднего значения для периода 1996–2015 гг. (116.55 см) и практически равно максимальному (125 см) для засушливого 2010 г. Увеличение испарения стимулировано усилением захвата и адвекции влаги над Каспием более сухими воздушными массами, поступающими из Центральной Азии. Уменьшение глубины моря также могло способствовать увеличению испарения.

10. Данные мониторинга современного климата и имеющиеся палеорекострукции, а также результаты расчетов с помощью моделей земной системы различных уровней сложности, подтверждают потенциальную возможность резких изменений ряда ключевых климатических процессов. Такие внезапные переходы получили признанное в МГЭИК название «Tipping Points». Они осуществляются за сравнительно небольшие интервалы времени, имеют нелинейную природу и могут существенным образом влиять на условия существования человечества и экосистем. Принципы адаптации к резким изменениям климата в настоящее время находятся на начальной стадии разработки.

Наиболее исследованным климатическим феноменом, способным испытывать переходы между существенно различными статистически устойчивыми состояниями, является термохалинная циркуляция Атлантического океана (Atlantic Meridional Overturning Circulation). Прекращение или существенное ослабление такой циркуляции оказало бы драматическое воздействие на климат Северо-Атлантического и Европейского регионов.

Исследование нелинейных, а именно бифуркационных механизмов, ответственных за формирование критических переходов, ещё далеко не завершено. Ведь совокупность действующих факторов включает в себя эффекты, связанные с внешним шумом и с нестационарностью внешнего детерминированного воздействия.

Актуальность предвидения будущих внезапных изменений климатической системы вполне очевидна. Это остаётся объектом пристального внимания ученых. Основные достижения в этой области связаны с концепцией критического замедления (Critical Slowdown) при приближении к опасным границам.

Интерес представляет недавно обнаруженный и связанный с теорией Tipping Points динамический феномен расщепления траекторий (splitting of trajectories). Это означает, в частности, потерю климатической предсказуемости второго рода.

Изучение процессов и причин, определяющих критические переходы в климатической системе, необходимо как для обнаружения реальных глобальных опасностей, так и для противодействия беспочвенному алармизму.

11. Целесообразно рекомендовать материалы докладов данного собрания для ознакомления с ними студентам и аспирантам учреждений высшего образования, обучающихся по направлению Гидрометеорология. Доклады посвящены актуальным вопросам современной науки и могут быть использованы в образовательном процессе по наукам об атмосфере и климате: "Теория климата", "Климатология", "Теория общей циркуляции атмосферы" и др.