ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В УМЕРЕННЫХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВЕДУЩИМИ МОДАМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В АТЛАНТИКО-ЕВРОПЕЙСКОМ СЕКТОРЕ

М.Ю. Бардин^{1, 2)}, Т.В. Платова^{1, 2)}, О.Ф. Самохина¹⁾

¹⁾ Институт глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Российской академии наук, Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б ²⁾ Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29 <u>mick-bardin@yandex.ru</u>

Резюме. Рассматривается структура отклика некоторых характеристик циклонической активности (общая повторяемость циклонических центров, частота циклогенеза и циклолиза, площади и глубины циклонов) в зоне умеренных широт Северного полушария на изменения фаз избранных мод крупномасштабной циркуляции атмосферы. Анализируется отклик для широко известных и хорошо документированных циркуляционных структур с доступными рядами численных индексов, из которых отобраны оказывающие заметное влияние на климатическую изменчивость Северной Евразии (Североатлантическое колебание, Восточно-Атлантическая, Скандинавская и Восточно-Атлантическая/Западно-Российская моды). Получены и проанализированы средние карты характеристик циклонической активности в противоположных фазах рассматриваемых мод для отдельных сезонов, в основном, зимы и лета. Описаны наиболее существенные различия как в области основных штормтреков над океанами, так и над континентами. Приведены возможные качественные объяснения наблюдаемым структурам отклика в приземных климатических полях на изменения фазы рассмотренных мод, использующие выявленные особенности циклонической активности в противоположных фазах и другие соображения, связанные с атмосферной циркуляцией. Обсуждаются возможные применения данных о географических особенностях и функциях распределения характеристик циклонической активности в зависимости от фаз ведущих мод атмосферной циркуляции для диагноза и сценарного прогноза региональных изменений климата, в особенности климатических и погодных экстремумов.

Ключевые слова. Циклоническая активность, моды атмосферной циркуляции, композитный анализ, температура воздуха, атмосферные осадки, корреляция, перенос.

SPECIFIC FEATURES OF VARIABILITY OF CYCLONE ACTIVITY IN NORTHERN EXTRATROPICS ASSOCIATED WITH LEADING ATMOSPHERIC CIRCULATION MODES IN ATLANTIC-EUROPEAN SECTOR

M.Yu. Bardin^{1, 2)}, T.V. Platova^{1, 2)}, O.F. Samokhina¹⁾ ¹⁾ Institute of Global Climate and Ecology, Glebovskaya str., 20B, 107258, Moscow, Russia, <u>mick-bardin@yandex.ru</u> ²⁾ Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 29, 109017, Moscow, Russia

Summary. The study concerns patterns of response of some indices characterizing cyclone activity (total frequency of cyclonic centers, frequency of cyclogenesis and cyclolysis, mean cyclone areas and depths) in the Northern Extratropics on changes in phases of particular large-scale atmospheric circulation modes. The response is analyzed for widely known and well-documented circulation patterns, mostly the ones with pronounced influence on climate variability of the Northern Eurasia (North Atlantic oscillation, East Atlantic mode, Scandinavian, and East Atlantic/Western Russia modes) and with easily accessible time series of numerical indices. Calculated composites of cyclone activity indices in opposite phases of the modes are analyzed for specified seasons, mainly winter and summer. Most distinctive features are described within the areas of principal ocean stormtracks, as well as over the continents. Simple possible qualitative explanations of observed response patterns in the surface climatic fields on the phases of the modes considered are given involving identified features of the cyclone activity in opposite phases and some other considerations related to the atmospheric circulation. Data on geographical patterns and other statistics of cyclone activity in relation to different phases of the leading atmospheric modes, and their possible applications to the diagnosis and the scenario forecast of regional climate changes, especially in climate and weather extremes, are discussed.

Keywords. Cyclonic activity, atmospheric circulation modes, composite analysis, air temperature, precipitation, correlation, transport.

Введение

Синоптические вихри и, прежде всего, подвижные циклонические образования, играют важную роль в общей циркуляции атмосферы. Возникая преимущественно в результате взаимодействия бароклинно-неустойчивого среднего потока с орографическими препятствиями или «термической орографией», подвижные тропосферные возмущения в своих фронтальных зонах порождают классические приземные циклоны. Они перемещаются средним потоком, получая на стадии развития энергию в результате взаимодействия с подстилающей поверхностью (преимущественно зимой над океаном) и быстро окклюдируясь; ансамбль баротропизирующихся синоптических вихрей, в свою очередь, передает энергию среднему потоку в тропосфере, подзападно-восточный перенос в результате «отрицательной держивая турбулентной вязкости» (Starr, 1968, Лоренц, 1970; также Монин, 1982). В тропосфере наблюдается непосредственная связь между формой и интенсивностью основных штормтреков и среднего потока (Lau, 1988). Аномалии циклонической активности в области основных штормтреков вызывают аномалии температуры поверхности океана и количества движения, включенные в систему океанической циркуляции, таким образом, внося вклад в формирование долгопериодной изменчивости системы океан-атмосфера. С другой стороны, синоптическими вихрями осуществляется перенос тепла и влаги в атмосфере; фронтальные системы циклонов ответственны за большую часть осадков умеренных широт. В том числе, с циклонами связана значительная доля гидрометеорологических рисков, ассоциирующихся с экстремальными осадками и ветром. Таким образом, долгопериодная изменчивость циклонической активности связана с основными климатическими модами в системе океан-атмосфера и определяет значительную часть изменчивости климата, включая экстремальные погодные явления, в определенных регионах.

Цель настоящей статьи — продемонстрировать основные связи между фазами ведущих климатических мод и региональной циклонической активностью в умеренных широтах Северного полушария. Максимум циклонической активности сосредоточен в северных частях Атлантики и Тихого океана во все сезоны. Однако приземные циклоны наблюдаются в умеренных широтах повсеместно над океанами и континентами: частично они перемещаются туда из областей основных максимумов, но наблюдается и значительное количество циклогенезов, в особенности летом над континентами, где имеются максимумы повторяемости циклогенеза столь же активные, как и области над океанами. В холодный период важный максимум циклогенеза наблюдается над Средиземным морем: отчасти это малоподвижные и сравнительно короткоживущие термические депрессии, но значительная часть возникающих депрессий перемещается на восток и северо-восток и играет важную роль в формировании погоды, в том числе в юго-восточных областях России.

Из приведенных кратких замечаний ясно, что особенности и изменчивость циклонической активности в различных регионах могут быть связаны не только с теми модами крупномасштабной атмосферной циркуляции, которые ассоциируются со взаимодействием океана и атмосферы и сосредоточены в океанских секторах СП, но и такими, например, как квазидвухлетнее колебание стратосферного ветра, и такими тропосферными модами, которые сосредоточены преимущественно над континентами, как Скандинавская или Восточно-Атлантическая — Западно-Русская (Barnston, Livezey, 1987). Мы уделим особое внимание тем модам, которые имеют более или менее выраженное проявление в климатической изменчивости над Северной Евразией. Кроме непосредственно анализа изменчивости характеристик циклонической активности в зависимости от фаз структур атмосферной циркуляции, определенное внимание будет уделено простым качественным соображениям по поводу наблюдаемой корреляции рассмотренных атмосферных индексов с приземными климатическими полями, включающими полученную информацию об особенностях циклонической активности.

Характеристики циклонической активности

Метод, использованный для идентификации циклонов и расчета их характеристик по данным барического поля в узлах регулярной сетки, использован ранее в работах (Бардин, 1995; Бардин, 2000; Бардин, Полонский, 2005). Он основан на том, что барическая депрессия представляет собой простой минимум геопотенциала, т.е. углубление изобарической поверхности, и на карте барической топографии ограничен простой замкнутой кривой *Lo*– изогипсой уровня *Zo* (на рис. 1 — левая ветвь зеленой «восьмерки»), такой, что внутри нее содержится единственный минимум (в точке *C* на рис. 1), а при *Z* > *Zo* соответствующая изогипса охватывает более одного центра. Тогда идентификация циклона сводится к 1) нахождению в дискретном поле минимума в узле Gc («истинный» минимум C не обязан быть в узле); 2) итерационному процессу с шагом dZ, при котором все узлы кроме Gc внутри контура Z проверяются на наличие минимума (т.е., второго минимума внутри контура); если второй минимум обнаружен, то Zo = Z - dZ, иначе шаг повторяется для Z + dZ. Перебор узлов внутри контура основан на простом алгоритме, использующем представление географической сетки в виде графа, вершины которого узлы, в которых значение геопотенциала $\langle Z,$ ребра — стороны боксов и одна из диагоналей (чтобы избежать неоднозначности при пересечении уровнем всех 4 сторон бокса), и тот факт, что узел Gc находится внутри контура.



Рисунок 1 — Схема к определению характеристик циклона

Далее, для области депрессии

 $So = \{x(f,l): Z(x) \le Zo$ и любая дуга (*xc*, *x*) пересекает контур *Lo* $\}$ рассчитываются следующие характеристики:

(fc, lc) — координаты «истинного» центра, определяемого как центр тяжести области внутри «минимального» контура Z(Gc)+dZ;

*Z***(***Gc***)** (гпм) — «значение в центре»;

d = |Zc - Zo| (гпм) — «глубина»;

 $a = \int_{x \in So} ds$ (км²) — площадь,

а также некоторые другие.

Характеристики всех депрессий за каждый срок анализа архивируются.

До сих пор мы избегали термина «циклон», поскольку в полях реанализа постоянно возникают мелкие короткоживущие «шумовые» минимумы, связанные скорее с методом анализа, которые должны быть предварительно отфильтрованы. Для этого использовалось условие, что «время жизни» циклона должно быть не менее определенного числа сроков анализа: конкретно, мы использовали 4-х срочные данные реанализа NCEP/NCAR геопотенциала H1000, сетка 2.5° (Kalnay et al., 1996). Такое усечение требует

предварительного объединения центров в полях за последовательные сроки в траектории. Выбранное условие отсечения для шумов — время жизни <6 сроков, что кажется вполне достаточным; в то же время отсекаются только самые короткоживущие (не более 1.5 суток) циклоны.

Исходными данными для дальнейших расчетов статистик циклонической активности является, таким образом, архив траекторий, полученный на основе алгоритма «ближайшего соседа» с ограничением возможного перемещения между сроками 600 км, с удаленными траекториями короче 6 сроков. Для траекторий, наряду с указанными выше «мгновенными» характеристиками для каждого срока, вводятся естественные характеристики «мгновенной скорости» (компоненты вектора перемещения между сроками и его модуль) и общие для всей траектории: координаты циклогенеза и циклолиза *Lo*.

Индексы атмосферной циркуляции

Уже давно было замечено, что некоторые наблюдаемые климатические особенности атмосферной циркуляции, так называемые «центры действия атмосферы», такие, как например Исландский минимум (ИМ), проявляющийся на средней многолетней карте давления как депрессия между южной оконечностью Гренландии и Исландией, и Азорский максимум (АМ) область повышенного давления в районе Азорских о-вов, имеют тенденцию к синхронным изменениям противоположного знака (атмосферный «диполь» или «качели»). Такие «дальние связи» в барических полях в значительной мере определяют характер долгопериодной изменчивости региональной циркуляции (в дальнейшем часто будет употребляться термин «средняя циркуляция» или «средний поток» — не в смысле многолетнего среднего, а в смысле циркуляции с отфильтрованными быстрыми колебаниями с характерными временными масштабами порядка недели, т.е. «синоптическими»). Они также существенно влияют на характер изменчивости климатических полей (температура, осадки и т.п.). По этому поводу имеется обширная литература; назовем лишь некоторые работы, имеющие близкое отношение к настоящему исследованию: Hurrell and van Loon, 1997; Wallace and Gutzler, 1981; Barnston and Livezey, 1987; Нестеров, 2013.

Для численной характеристики определенных типичных региональных особенностей ОЦА предложен ряд индексов. Наиболее простые из них основаны непосредственно на наблюдаемых значениях давления в отдельных пунктах (на станциях): например, классический индекс Североатлантического колебания (САК): разность нормированных аномалий давления в Рейкьявике и Понта-Дельгада (вариант: Лиссабон). Другие подходы используют значения давления (или геопотенциала определенной изобарической поверхности) в узлах регулярной сетки. Простые и устойчивые индексы получаются осреднением (как правило, аномалий) по площади определенных «ключевых районов» (Trenberth and Hurrell, 1994; Бардин, 1996). Более сложные индексы получаются разложением барических полей по эмпирическим ортогональным функциям (ЭОФ): Hurrell, 1995, иногда с дальнейшим их вращением с целью

получить более отчетливые структуры (Barnston and Livezey, 1987). В подпространстве малой размерности, полученном редукцией до нескольких ведущих ЭОФ или каким-либо другим способом, и, как правило, используя ту или иную временную фильтрацию, можно оценить эмпирическую плотность вероятности нахождения системы в определенном состоянии и выявить ее максимумы (моды ф.п.р.), откуда, собственно, и широко распространенный термин: «мода атмосферной циркуляции» или «климатическая мода» (Molteni et al., 1990, Corti et al., 1999; Бардин, 1996).

В работе мы использовали широко распространенные индексы атмосферной циркуляции, данные которых легко доступны и постоянно обновляются.

Для характеристики САК использовался индекс, представляющий собой первую главную компоненту (ГК) давления на уровне моря в атлантическом секторе 20–80°с.ш., 90°з.д.– 40°в.д. (Hurrell, 1995), источник данных — NCAR (https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/climate_index_files/ nao pc monthly.ascii).

Остальные индексы — Barnston and Livezey, 1987, представляют собой проекции на ведущие полушарные моды месячных полей H500. Моды получены как результат варимаксного вращения первых 10 ЭОФ H500, рассчитанных отдельно для всех месяцев каждого сезона за 1950–2000 гг. Источник: ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh.

Методы выделения структуры сигнала

Для характеристики циклонической активности в противоположных фазах использовался метод эмпирических условных статистик, широко известный в англоязычной литературе как «composite analysis» (в русскоязычной часто применяется калька «анализ композитов»). Сравнивались средние поля, полученные по 15% наибольших по величине положительных и отрицательных значений индекса для месяцев рассматриваемого 3-месячного сезона. Использовались данные за 1958–2013 гг. (отсечение 1958-м годом объясняется тем, что именно с этого времени количество данных радиозондирования считается достаточным для полноценной системы усвоения данных). Для каждой фазы выборка составляла, таким образом, 25 месяцев.

Значимость различий композитов повторяемости циклонических центров оценивалась с помощью построения для каждой из фаз биномиальной функции распределения повторяемости в каждой ячейке выбранной сетки (конкретно, 5×5 градусов), основываясь на схеме Бернулли с вероятностью успеха, равной повторяемости: $p_{\psi}(f, l) = Nc_{\psi}(f, l)/N_{\psi}$; здесь $Nc_{\psi}(f, l)$ — число наблюдений центра циклона в выборке для фазы ψ (+ или –) над ячей-кой с координатами (f, l), N_{ψ} — полный объем выборки для фазы ψ ($\approx 25 \times 30 \times 4 = 3000$) и оценке вероятности повторяемости в одной из фаз в предположении, что распределение принадлежит другой фазе. Различие считалось значимым, если в обоих случаях вероятность была меньше 1%. Точнее, если $N_+ > N_-$, то различие значимо, если Φ_+ (N_-)<0.01 и 1– Φ_- (N_+)<0.01 (Φ_w — $\phi.p.$ для фазы ψ).

Для оценки значимости различия средней глубины и площади циклона в ячейке

$$EXc_{\psi}(f, l) = \sum_{i=1..Nc \,\psi(f,l)} Xc^{i}_{\psi}(f,l) / Nc_{\psi}(f,l)$$

 $Xc_{\psi}^{i}(f, l)$ — площадь или глубина циклона с центром в соответствующей клетке, использовался критерий Стьюдента с «исправленным» числом степеней свободы

 $Nc^{*}_{+}(f, l) + Nc^{*}_{-}(f, l) - 2$, где $Nc^{*}_{\psi}(f, l)$ — число «независимых» наблюдений центра циклона в ячейке). Независимыми считались наблюдения циклона в одной ячейке, разделенные не менее, чем двумя сроками (т.е., 18 часами).

Характеристики циклонической активности в противоположных фазах ведущих мод

Интуитивно ясно, что различие формы и интенсивности основного западно-восточного переноса в умеренных широтах СП в зависимости от фазы ведущей региональной моды атмосферной циркуляции должно приводить к различию в локализации областей активного циклогенеза (в особенности для мод, сосредоточенных в океанских секторах) и/или преимущественных путей перемещения циклонов — и, в конечном счете, в географии повторяемости циклонических центров, а также в характеристиках интенсивности циклонов. В работе (Бардин, Полонский, 2005) проанализированы статистики некоторых характеристик циклонической и антициклонической активности в зависимости от фазы САК и показано, что значимые различия наблюдаются как в области основного атлантического штормтрека, так и восточнее вдоль основного переноса, а также регионе Средиземного и Черного морей. Более подробный анализ, включающий расширенный набор характеристик и моды Тихоокеанского сектора, но только для циклонов, выполнен в (Polonsky et al., 2012). В настоящей работе аналогичный анализ будет представлен для основных мод циркуляции, влияющих на климатическую изменчивость Северной Евразии, причем не только для зимнего сезона, но также для лета или одного из переходных сезонов — в зависимости от сезонной активности рассматриваемой моды.

Североатлантическое колебание (САК)

Наиболее выраженный сигнал в различных характеристиках циклонической активности ассоциируется с Североатлантическим колебанием. Значимые различия повторяемости циклонов в противоположных фазах САК наблюдаются в различных регионах умеренных широт практически всего СП (рис. 2; рис. 6).

Зима. Самые значительные различия повторяемости циклонов в противоположных фазах САК наблюдаются, естественно, в Атлантическом секторе: в положительной фазе повышенная повторяемость наблюдается в северной части (от 60°с.ш.) до Баренцева моря и в южной — в отрицательной фазе (рис. 2). Заметим, что структуры поля давления, отвечающие индексам САК Херрелла и Барнстона-Ливзи для зимы очень близки и так же близки структуры отклика в повторяемости циклонов.

Эти особенности в Атлантическом секторе ярко выражены в корреляции индекса САК с полями осадков и температуры (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/ data/teledoc/nao_pmap.shtml и /teledoc/nao_tmap.shtml: в дальнейшем, ссылаясь на этот сайт, мы будем опускать начало адреса, оставляя вторую часть). Для осадков эта корреляция положительна в северной части сектора и отрицательна — в южной и обусловлена осадками во фронтальных системах циклонов. Для температуры ситуация обратная — повышенная повторяемость циклонов вызывает выхолаживание поверхности океана. Максимум положительной корреляции наблюдается у восточного побережья США южнее Ньюфа-ундленда, где в отрицательной фазе САК повторяемость циклонов значительно обрасть отрицательной корреляции и далее на восток почти до Британских островов — соответствует области максимальной повторяемости в положительной фазе.



Рисунок 2 — Повторяемость циклонов (%) зимой в положительной и отрицательной фазах САК (средние за 25 зимних месяцев с наибольшими по величине положительными и 25 месяцев — отрицательными значениями индекса). На врезках приведены: структура 1-й ЭОФ поля давления в положительной фазе САК https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrellnorth-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based (красные изолинии соответствуют отрицательным аномалиям давления в положительной фазе САК); корреляции индекса с полями температуры и осадков (/teledoc/nao_tmap.shtml и /teledoc/nao_pmap.shtml): для температуры положительные корреляции показаны оттенками оранжевого, для осадков — зеленого.

Можно, впрочем, ожидать, что выхолаживание поверхности в области мощной системы теплых течений в Северной Атлантике ослабляется глубоким перемешиванием верхнего слоя океанических вод штормовыми ветрами в циклонах, что сохраняет горизонтальные и вертикальные градиенты температуры и дает возможность достаточно продолжительного сохранения аномально высокой циклонической активности и поддерживаемого ею среднего потока.

С другой стороны, положительная корреляция индекса САК с температурой в северной и центральной зоне Европы объясняется, по-видимому, в основном, усилением среднего западно-восточного переноса теплого воздуха с Атлантики на холодный континент между 50-60°с.ш. в положительной фазе САК (рис. 3). Можно предположить, что частично теплый воздух доставляется в северную Европу переносом на юг теплого воздуха из района Североатлантического течения в тылу проходящих севернее Скандинавии (и уже, в основном, окклюдированных) циклонов (Блютген, 1973). Однако средний меридиональный ветер в положительной фазе САК в этой области направлен на север, так что требуется более детальный анализ меридиональных потоков тепла, связанных с вихрями. Суммарный вихревой перенос тепла в Северном полушарии зимой в основном имеет превалирующую северную компоненту, но над Скандинавией зональная компонента сравнима или больше зональной (Held 1999, fig. 2), так что возможны различные варианты для знака меридиональной компоненты в зависимости от фазы рассматриваемой моды: см. напр. ниже рис.11 векторы перемещения циклонов в положительной фазе моды ВА/ ЗР (для САК ситуация сложнее и требует детального расчета). Аналогично, усилением зонального переноса в отрицательной фазе над континентом между 30-40°с.ш. объясняется отрицательная корреляция САК с температурой в Северной Африке и далее в Малой Азии, Ираке и Иране: см. карту зонального ветра в отрицательной фазе САК на рис. 3. В Северной Африке и Малой Азии также может играть значительную роль перенос тепла, в том числе скрытого, связанный со средиземноморскими циклонами, как показывает корреляция с осадками.



Рисунок 3 — Средний зональный ветер на изобарической поверхности 850 гПа в положительной и отрицательной фазах CAK по данным реанализа NCEP/NCAR CDAS1 (Kalnay et al., 1996)

Важным обстоятельством является высокая повторяемость циклонов в отрицательной фазе САК в Средиземноморском-Черноморском регионе. Следует обратить внимание на повышенную повторяемость циклонов в отрицательной фазе САК на севере Евразии, в особенности на севере Западной Сибири.

Отметим некоторые важные обстоятельства, связанные с фазами «жизненного цикла» атлантических циклонов. Сначала коснемся географического распределения циклогенеза и циклолиза. На рис. 4 представлены относительные значения повторяемости этих явлений, рассчитанные как отношение числа циклогенезов (циклолизов) в каждой ячейке сетки 5 × 5 градусов к среднему значению этой величины для обеих фаз:

 $RNg^+(kf, kl) = Ng^+(kf, kl) / \{0.5 \times \sum_{jf} \sum_{jl} [Ng^+(jf, jl) + Ng^-(jf, jl)] / (nf \times nl) \}$ Здесь $Ng^+(jf, jl) (Ng^-(jf, jl))$ — суммарное число циклогенезов в ячейке (jf, jl)

Здесь Ng^+ (*jf*, *jl*) (Ng^- (*jf*, *jl*)) — суммарное число циклогенезов в ячейке (*jf*, *jl*) в выборке для положительной (отрицательной) фазы, nf(nl) — число ячеек вдоль меридиана (параллели), RN — относительное число. Аналогично для циклолизов.

Хорошо видно, что области, где относительная величина циклогенеза > 1, довольно узки, в то время как области циклолиза существенно «расплываются», в особенности над материком.

Суммарно основной областью зимнего циклогенеза в Северной Атлантике является область вблизи восточного побережья США, более активная в отрицательной фазе САК: RNg^- здесь достигает 7.5, а RNg^+ – 5. В то же время, существует представление, что высокая повторяемость циклонов в районе Исландии преимущественно связана с малоподвижными окклюдированными циклонами в завершающей стадии развития (Блютген, 1973; Погосян, 1952). Частично это так: указанная область характеризуется высокой повторяемостью циклолиза; также именно здесь при слиянии нескольких уже достаточно крупных циклонов возникают сверхкрупные «центральные» циклоны, оказывающие значительное влияние на погоду в Западной Европе (Хромов, 1974). Однако, из рис. 4 видно, что в положительной фазе САК в области между Гренландией и Исландией наряду с циклолизом наблюдается также очень активный циклогенез, более интенсивный, чем у побережья США (RNg^+ достигает 11.5). В отрицательной же фазе САК ни активного циклогенеза, ни циклолиза в этой области не наблюдается.



Рисунок 4 — Относительное число циклогенезов (слева) и циклолизов в ячейке 5x5⁰ зимой положительной и отрицательной фазах САК (за 25 месяцев с максимальными по абсолютной величине значениями индекса САК в каждой из фаз).

Глубины, которых в среднем достигают циклоны в обеих фазах САК, приблизительно одинаковы — около 160 гпм (рис. 5), максимум наблюдается в том и другом случае вдоль 55°с.ш., но область максимальных глубин в положительной фазе значительно протяженнее: от 60°3.д. до нулевого меридиана, в то время как в отрицательной фазе от от 50 до 20°з.д. В положительной фазе циклоны значительно глубже в Северном и Норвежском морях, а в отрицательной в западной части океана южнее 50°с.ш. Для площади циклонов ситуация противоположная: средняя площадь в отрицательной фазе превышает 2 млн. кв. км, практически, во всей зоне от 30 до 70°с.ш., ав положительной — в относительно узкой полосе между 50 и 70°с.ш. Максимальные средние значения более 3.5 млн. кв. км в положительной фазе наблюдаются в небольшой области в Северном море и только там заметно превышают площади циклонов в отрицательной фазе, в которой такие крупные по площади циклоны наблюдаются, практически, в той же области, что и наиболее глубокие. Таким образом, грубо говоря, над большей частью океана наиболее крупные циклоны положительной фазы САК глубже, но меньше по площади, чем в отрицательной фазе.



Рисунок 5 — Средняя площадь и глубина циклонов в противоположных фазах САК: зима

Лето. (Следует иметь в виду, что на летних картах повторяемости циклонов имеются несколько небольших — 1–3 узла сетки — областей с нереально высокими значениями повторяемости циклонов в районе мощных горных систем Азии: депрессии наблюдаются там почти постоянно; скорее всего, это связано с ошибкой реанализа в сложных орографических условиях.)

В отрицательной фазе САК атлантический штормтрек распадается на три области высокой повторяемости. Начальная (западная) ветвь огибает с юга Гудзонов залив и оканчивается между Ньюфаундлендом и южной оконечностью Гренландии. Центральная расположена южнее Исландии (45–60°с.ш.). Восточная — в южной части Скандинавского п-ова, т.е. штормтрек менее зонален, чем зимой: это соответствует отклонению южной части диполя САК и, вместе с тем, полосы максимальных барических градиентов к северу — см. врезку на рис. 6. Отметим здесь, что летняя структура САК, полученная Барнстоном и Ливзи (1987), значительно отличается от предложенной Херреллом (и от зимнего САК, почему и был использован индекс Херрелла). У Барнстона-Ливзи диполь, в целом, смещен на запад к побережью Северной Америки, но южная его часть распадается на две ветви; более слабая западная расположена между Британскими о-вами и югом Скандинавии: в результате для этой моды структура отклика в Атлантическом секторе близка к полученной для САК Херрелла. В положительной фазе восточная ветвь отсутствует; от области максимума в районе Исландии штормтрек уходит на северо-запад в направлении Шпицбергена. Это различие определяет знак корреляции индекса САК с температурой (положительный) и осадками (отрицательный) в северо-западной части Европы: циклоны в отрицательной фазе САК доставляют сюда холодный воздух с Атлантики и повышенные осадки.



Рисунок 6 — Повторяемость циклонов (%) летом в положительной и отрицательной фазах CAK. На врезке — структура поля давления в положительной фазе CAK (https:// climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-pc-based)

Важным для Северной Евразии является то обстоятельство, что заметная повторяемость циклонов летом наблюдается над континентом в полосе 50–70°с.ш.: в Западной Сибири имеется штормтрек, в фазе САК+ — столь же интенсивный, как и атлантический. Однако, в целом, циклоническая активность в этой зоне выше в отрицательной фазе САК и в этом аспекте особый интерес представляет повышенная повторяемость циклонов в западной части СНГ (проявляется на карте корреляции индекса САК с полем осадков: / teledoc/nao_pmap.shtml), а также в средней Сибири.

Восточно-Атлантическая мода (ВАМ)

Зима. Соответствующее положительной фазе ВАМ поле давления (врезка на рис. 7) в Атлантическом секторе на первый взгляд незначительно отличается от «сильной» фазы САК: диполь с низким давлением на севере и высоким — в субтропиках; однако, волновые структуры этих мод в меридиональном направлении смещены на четверть периода или около 10–15° широты (диполь САК расположен севернее). Пространственные структуры отклика на эти моды в полях температуры и осадков различаются не только широтой максимумов, но и долготой и величиной, однако сосредоточены преимущественно в Атлантическом и западной части Европейского сектора (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml). В то же время, как показывает рис. 7, повторяемость циклонов в зимний сезон чувствительна к фазе ВАМ практически на всем полушарии.



Рисунок 7 — Повторяемость циклонов (%) зимой в положительной и отрицательной фазах BAM. На врезках — структура поля давления в положительной фазе BAM (/teledoc/ ea_map.shtml) и корреляция индекса BAM с полем температуры (/teledoc/ea_tmap.shtml)

Форма отклика в повторяемости циклонов в Атлантическом секторе ожидаема в соответствии со структурой моды: диполь, смещенный на юг по отношению к отклику на САК, плюс область повышенной повторяемости циклонов в отрицательной фазе севернее и северо-восточнее максимума положительной фазы (только намечающаяся для САК). Однако, различия в форме основного штормтрека выражены значительно менее, чем для САК и проявляются, в основном, во вторичных ветвях. Одна из них расположена к западу от Исландии и в положительной фазе начинается значительно южнее, чем в отрицательной (в отрицательной фазе циклоны в области к юго-западу от Исландии почти не наблюдаются). Другая проявляется только в отрицательной фазе и расположена в центре Северной Атлантики около 30° с.ш., отклоняясь западнее к северу до Пиренейского п-ова. С другой стороны, в фазе ВАМ+ отсутствует область повышенного циклогенеза между Гренландией и Исландией, а в отрицательной фазе она очень интенсивна и RNg^+ достигает здесь 8.5 (рис. 8) — см. замечания по этому поводу относительно САК. В обеих фазах эта область является областью циклолиза, так же, как и область к югозападу от южной оконечности Гренландии.

Как и для САК, повторяемость циклонов в Средиземноморье выше в отрицательной фазе ВАМ, но различия не столь выражены и не распространяются на северную часть Черноморского региона.

Радикальные и важные для регионального климата различия в отклике на САК и ВАМ наблюдаются на севере Восточной Европы и в Азии: здесь повторяемость циклонов выше в положительной фазе ВАМ и отрицательной — САК. В обоих случаях максимум отклика наблюдается в районе Обской губы. В отрицательной фазе ВАМ циклоны почти не наблюдаются в Байкальском регионе.



Рисунок 8— Относительное число циклогенезов (слева) и циклолизов в ячейке 5 × 5⁰ зимой положительной и отрицательной фазах ВАМ (за 25 месяцев с максимальными по абсолютной величине значениями индекса ВАМ в каждой из фаз).

В поле осадков максимальная положительная корреляция с индексом ВАМ наблюдается над океаном в области, где повторяемость циклонов значительно

выше в положительной фазе, и менее значительная — в Западной Сибири; отрицательная корреляция — в восточной части Средиземного моря и Черноморском регионе, где выше повторяемость осадков в отрицательной фазе ВАМ. Наиболее значительная корреляция с температурой наблюдается в Атлантике между 25 и 35°с.ш. — выхолаживание при повышенной повторяемости циклонов в отрицательной фазе ВАМ, а также над Западной Европой: как и в случае САК здесь основную роль играет средний перенос в положительной фазе ВАМ, близкий по форме к таковому для САК+, но сильно ослабевающий перед Скандинавией (восточнее корреляция не наблюдается).

Различия между сигналами САК и ВАМ в области тихоокеанского штормтрека проявляются в более мелкомасштабных подробностях: смещение западной ветви штормтрека на восток и более значительное усиление центральной ветви в положительной фазе ВАМ, отсутствие сигнала ВАМ в заливе Аляски.

Лето. Непосредственно в Северной Атлантике сигнал ВАМ летом заметно слабее, чем зимой. Основной атлантический штормтрек распадается на три части, аналогично отрицательной фазе САК; все три интенсивнее в положительной фазе.

Имеются заметные различия в Тихом океане, связанные для западной ветви штормтрека со смещением на север и интенсификацией восточной (в заливе Аляски) в положительной фазе (рис. 9).



Рисунок 9 — Повторяемость циклонов (%) летом в положительной и отрицательной фазах BAM. На врезке — структура поля давления в положительной фазе BAM (http:// www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/ea_map.shtml)

Штормтрек в Западной Сибири выражен в положительной фазе.

Положительная корреляция BAM с температурой в восточной части Средиземного моря, на юге Центральной Европы и Черноморском регионе связана с повышенной повторяемостью циклонов в отрицательной фазе. Здесь же наблюдается (незначительная) отрицательная корреляция с осадками.

Восточно-Атлантическая/Западно-Российская мода

В отличие от предыдущих двух структур атмосферной циркуляции, чьи «центры действия» локализованы над океаном, следующие две моды преимущественно «континентальные». Другое их отличие состоит в том, что они представляют собой зональные «волновые» структуры, в то время как САК и ВАМ представляют собой волны меридиональные. Известно, что на внутрисезонных масштабах изменчивости определенные фазы таких волновых структур ассоциируются с блокированием западно-восточного переноса. Для Атлантики этот вопрос хорошо изучен, начиная с классических работ Рекса (Rex, 1950) и развит во многих работах (Charney et al., 1981; Plaut and Vautard, 1994; Pelly and Hoskins, 2003); основной тип блокирования здесь — «перевернутый» диполь, т.е. отрицательная фаза САК (с укороченным до 30°з.д. атлантическим штормтреком и расщеплением зонального потока: рис. 2 и 3) или ВАМ (с почти полным отсутствием циклонов в восточной части Атлантики между 45 и 60°с.ш.). Некоторые вопросы, связанные с блокированием в западной части Северной Евразии рассмотрены в (Обухов и др., 1984, Бардин, 2007).

Зима. Основная барическая структура, характеризующая положительную фазу ВА/ЗР, включает область положительной аномалии с центром в районе Британских о-вов и области отрицательной аномалии на востоке (центр в районе Южного Урала) и более слабую на западе (центральная и западная части Атлантики). Несмотря на достаточно слабую западную полуволну, различия в повторяемости циклонов над океаном в противоположных фазах весьма значительны (рис. 10). В положительной фазе мощный штормтрек наблюдается от 45° з.д., 50° с.ш., а в отрицательной сосредоточен в области между Гренландией и Исландией. Напротив, в западной части Атлантики у берегов США штормтрек значительно мощнее в отрицательной фазе

Как видно из рисунка 10, аномалии повторяемости чередуются с запада на восток, а не с севера на юг, как в случае САК и ВАМ. Основная отрицательная аномалия повторяемости для ВА/3Р+ расположена в восточной Атлантике — Западной и Центральной (частично Восточной) Европе до 30° в.д на севере и до 40° на юге. Центр этой области в положительной фазе характеризуется перманентным блокированием: здесь в этой фазе циклоны не наблюдаются и, как видно из рис. 11, обтекают с севера и юга центр указанной области (другая аналогичная область наблюдается в обеих фазах на юге Сибири и связана с Сибирским антициклоном).

Повышенная циклоническая активность в отрицательной фазе BA/3P определяет положительную аномалию осадков в Восточной Атлантике

вблизи Британских о-вов, в балтийском регионе и, особенно, в северо-восточном Средиземноморье и юго-западе Восточной Европы; в то же время очень малое количество циклонов в этих регионах в положительной фазе влечет дефицит осадков. Все это определяет здесь заметную отрицательную корреляцию индекса ВА/ЗР с осадками (не показано). Напротив, восточнее наблюдается положительная (хотя существенно более слабая) отрицательная корреляция.



Рисунок 10— Повторяемость циклонов (%) зимой в положительной и отрицательной фазах BA/3P. На врезках— структура поля давления в положительной фазе BA/3P (/teledoc/ eawr map.shtml) и корреляция индекса с температурой воздуха

Для температуры наблюдается обширная область отрицательной корреляции в восточном Средиземноморье (включая восток Северной Африки), Ираке и севере Аравийского п-ова, и на юго-западе Восточной Европы. Повидимому, она объясняется затоком холодного воздуха (средний меридиональный ветер и холодные циклоны) из северных частей Восточной Европы по восточной периферии блокирующей области высокого давления в положительной фазе ВА/ЗР (рис. 11) и в отрицательной фазе — повышенной циклонической активностью на северо-востоке Средиземноморья и в Черноморском регионе; однако остается неясным происхождение отрицательной корреляции для территории Ирака и севера Аравийского п-ова



Рисунок 11 — Для противоположных фаз ВА/ЗР показаны: слева — скорости перемещения циклонов (векторы пропорциональны перемещению между сроками анализа); справа — меридиональный ветер на изобарической поверхности 850 гПа (шаг изолиний — 1 м/с; оттенки синего — северный ветер; розового — южный).

Весна. Летом мода BA/3P выражена очень слабо (/teledoc/eawr_map.shtml). Структуры барических полей BA/3P весеннего и осеннего сезонов почти также сильны, как зимой, и довольно близко напоминают друг друга. Близки в области основных центров действия их отклики в циклонической активности и приземных климатических полях. Поэтому мы выбрали одну из них — весеннюю, поскольку для нее наблюдаются интересные особенности отклика в области тихоокеанского штормтрека.

Основной отклик в повторяемости циклонов наблюдается в секторе 60°3.д-90°в.д. Он положителен над океаном (до 10°3.д.) в зоне 40–60°с.ш. и над континентом между 40 и 90°в.д. в зоне 50–70°с.ш., и отрицателен между 10°з.д и 40°в.д в зоне 50-70°с.ш. (рис. 12). Центральная и восточная части атлантического штормтрека в положительной фазе существенно активнее и центральная часть расположена, примерно, на 10° восточнее. Значительный по величине отклик наблюдается также в районе Балтики и на севере Западной Сибири. Наблюдается также положительный отклик в Малой Азии и на севере Аравийского п-ова.

На севере Тихого океана прежде всего отмечается ослабление циклонической активности в положительной фазе ВА/ЗР в центральной части и усиление над Охотским морем; также интенсифицируется максимум в заливе Аляски (рис. 12). В поле осадков заметного отклика не отмечается. Зато в поле температуры отрицательная корреляция с индексом ВА/ЗР наблюдается над Восточной Европой и частью Западной Сибири.



Рисунок 12 — Повторяемость циклонов (%) весной в положительной и отрицательной фазах BA/3P. На врезке — структура поля давления в положительной фазе BA/3P (http:// www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/eawr_map.shtml)

Скадинавская мода

Зима. Стоит отметить, что название «Скандинавская» для этой моды не слишком удачно, поскольку основной центр действия расположен над Кольским п-овом. Для этой моды наблюдаются наиболее крупномасштабные структуры отклика, по крайней мере, над континентом.

Общая структура отклика на изменения фазы СКА близка к таковой для ВА/ЗР, однако, смещена приблизительно на "четверть периода" (около 20 град. долготы) на восток основного триполя. Однако, южная ее часть — положительный отклик на юге — сохраняется, что приводит к усилению отклика над Средиземным морем. Максимум отклика, рост повторяемости в отрицательной фазе СКА, наблюдается над Баренцевым морем и почти всей европейской частью России. С другой стороны, в Западной и Центральной Европе в фазе СКА — циклоны практически не наблюдаются (рис. 13).

В Атлантике преобладает положительный отклик, особенно в начальной и конечной ветвях основного штормтрека: в центральной части повторяемость выше в отрицательной фазе. В Тихом океане основной отклик — смещение центральной части штормтрека на север в Берингово море в отрицательной фазе.

Корреляция с осадками: отрицательная в Норвежском море и Скандинавии, на севере Европы и Западной Сибири до Оби и положительная от Атлантики вблизи берегов Пиренейского п-ова и далее по всему Средиземноморскому бассейну, — вполне удовлетворительно объясняется особенностями распределения циклонической активности в противоположных фазах СКА



Рисунок 13 — Повторяемость циклонов (%) зимой в положительной и отрицательной фазах СКА. На врезках — структура поля давления в положительной фазе СКА (/teledoc/scand.shtml) и корреляции индекса СКА с температурой воздуха и атмосферными осадками (/teledoc/ scand_tmap.shtml и scand_pmap.shtml); зональный ветер на поверхности 850 гПа в положительной и отрицательной фазах СКА (шаг изолиний 1м/с).

Температура зимой отрицательно коррелирует с индексом СКА на большей части Северной Евразии (кроме арктического побережья и дальнего Северо-Востока России), с максимумом между 50° и 90° в.д. В отрицательной фазе СКА полоса максимальных зональных ветров в нижней тропосфере проходит над Атлантикой и далее — над Европой и Азией между 50-60°с.ш. до 120°в.д. Около 50°в.д. она сливается с потоком воздуха с Черного моря, а в районе Каспия имеется южное ответвление. Все это способствует созданию фона относительно теплого воздуха между 45-60°с.ш. Напротив, в положительной фазе в этой зоне между 10° и 70°с.ш. западный перенос блокируется; полоса максимальных ветров расположена около 70°с.ш. в результате наличия мощного гребня с осью около 40°в.д. Структура барического поля в положительной фазе СКА близка к рассмотренной в (Бардин, 2007) Карельской кваантициклонической циркуляции; соответствующая зистационарной ей обширная область отрицательной аномалии температуры также охватывает почти всю Северную Евразию, но максимум расположен севернее, чем максимум корреляции и соответствует области восточных ветров на врезке для СКА+. Таким образом, по-видимому, распределение температурных аномалий фазах СКА+ и СКА- несимметрично и смещение корреляции на юг определяется смещением зональных ветров на юг в отрицательной фазе.

Лето. Летняя структура СКА, как и зимняя, в положительной фазе включает диполь с областью повышенного давления в районе Скандинавии (с менее интенсивным продолжением на юго-запад в Атлантику почти до Ньюфаундленда) и отрицательной в Сибири (смещенной по отношению к зиме на север). Замечательной особенностью летней СКА+ является пояс пониженного давления, охватывающий все полушарие преимущественно около 30° с.ш., но над Европой поднимающийся до 40–55°с.ш. (врезка на рис. 14).



Рисунок 14 — Повторяемость циклонов (%) летом в положительной и отрицательной фазах СКА. На врезках — структура поля давления в положительной фазе СКА (/teledoc/scand.shtml) и корреляции индекса СКА с температурой воздуха (/teledoc/scand_tmap.shtml); зональный ветер на поверхности 850 гПа в положительной и отрицательной фазах СКА (шаг изолиний 1м/с).

В области атлантического штормтрека структура отклика напоминает «опрокинутый» отклик для летнего ВАМ, но в случае ВАМ центр действия на севере Атлантики значительно интенсивнее, так что и различия повторяемости циклонов больше. С другой стороны, для СКА характерен ярко выраженный отклик на севере Европы — положительный в отрицательной фазе, связанный с ЦД в районе Скандинавии (рис. 14). Азиатский полюс диполя в структуре СКА проявляется в положительной фазе в смещении к северу и интенсификации сибирского летнего штормтрека, который сливается с северным зональным штормтреком в Восточной Сибири (тоже, в свою очередь, усиливающимся в положительной фазе СКА). Южный пояс низкого давления в положительной фазе СКА). Южный пояс низкого давления в положительной фазе СКА также проявляется в повышенной повторяемости циклонов над океанами (особенно Тихим) между 30–40°с.ш., а также над Северной Африкой, Средиземным морем и Европой до 55 °с.ш. (включая усиление восточно-европейского штормтрека). В области тихоокеанского штормтрека заметно увеличение повторяемости циклонов в заливе Аляски.

Структура корреляции индекса с полем температуры соответствует аномалиям температуры в течение эпизодов Карельской квазистационарной антициклонической циркуляции (Бардин, 2007), блокирующей зональный перенос над Скандинавией и ЕЧР.

Обсуждение

Зимой наиболее значительная повторяемость циклонов наблюдается над океанами в области основных штормтреков. Форма их, однако, изменяется в зависимости от фазы наблюдаемой ведущей моды, и может изменяться весьма существенно: так, в отрицательной фазе САК отсутствует ветвь атлантического штормтрека в районе Исландии и весь он от Ньюфаундленда расположен почти зонально (а не как обычно в северо-восточном направлении), так что его восточная часть расположена на 20 градусов южнее и 50 градусов западнее, чем в положительной фазе.

Хотя рассмотренные моды характеризуются структурами барических полей, сосредоточенными в основном в Атлантико-Европейском секторе, отмечается их влияние на циклоническую активность севера Тихого океана как зимой, так и в теплые сезоны. Наиболее заметный отклик обычно наблюдается в районе Алеутской депрессии и может выражаться как в смещении максимума повторяемости по широте, так и в изменении интенсивности. В некоторых случаях ярко выражены изменения в восточной (залив Аляски) и западной (Охотское море) частях штормтрека -— например, весной для моды BA/3P.

Летом значительная повторяемость циклонов наблюдается над континентом. Область высокой повторяемости циклонов на юге Скандинавии является восточной частью атлантического штормтрека и наиболее интенсивна в фазе САК-(и отсутствует в фазе САК+). Над Северной Евразией летом имеются два штормтрека с сильной меридиональной составляющей. Более крупный из них в Западной Сибири начинается между Аралом и оз. Балхаш и заканчивается в районе Обской губы. В зависимости от фазы текущей ведущей моды он может быть более или менее протяжен и интенсивен: наиболее интенсивен в фазе САК+, а протяжен в фазе ВАМ+. Другой из Черноморского региона направлен в центр ЕЧР и наиболее интенсивен в фазах САК- И СКА+. Про этот штормтрек известно, что его интенсивность и положение связаны не только с формами тропосферной циркуляции, но и с фазой квазидвухлетнего колебания стратосферного ветра (Черенкова и др., 2015). Летом же наблюдается протяженный зонально вдоль 65°с.ш. штормтрек над Средней и Восточной Сибирью, наиболее интенсивный в положительной фазе Скандинавской моды.

Все рассмотренные моды атмосферной циркуляции оказывают значимое влияние на циклоническую активность в обширных областях умеренных широт Северного полушария, в том числе, в Северной Евразии; однако выявленные до сих пор их корреляции с приземными климатическими полями существенно более ограничены географически. В связи с этим несоответствием требуется более тщательный анализ связей, использующий станционные данные климатических переменных, в том числе суточного разрешения для анализа связи с погодными экстремумами. Здесь стоит отметить, что определенные фазы некоторых мод явно ассоциируются с расщеплением зонального потока, что указывает на участие в их формировании явлений, сходных с блокированием, что также должно быть рассмотрено при анализе аномалий и экстремумов климатических переменных, связанных с циркуляционными модами (Бардин, 2007).

Возникающие в определенных фазах атмосферных мод аномалии ТПО, связанные с вариациями циклонической активности, могут вызывать длительные аномалии погодных условий в обширных регионах, включая значительные части континентов, что полезно учитывать для долгосрочных (до сезона) прогнозах погоды.

Характеристика циклонической активности в связи с фазами ведущих мод атмосферной циркуляции, или климатической изменчивости, важна, в частности, в связи с трудностью моделирования циклонической активности — будь то с использованием МОЦАО (которые плохо воспроизводят даже климатические ее особенности), или эмпирических динамико-стохастических моделей (плохие свойства распределений). Крупномасштабные моды моделируются значительно лучше (см. многочисленные работы по статистическому даунскейлингу, напр. von Storch et al., 1993), хотя имеются проблемы со спектром изменчивости (Бардин 2011). "Нелинейная парадигма Палмера" сводит изменения климата к изменению наблюдаемых частот ведущих мод (Corti et al., 1999), что в принципе позволяет прогнозировать связанную с этими модами циклоническую активность. Однако в действительности даже для САК некоторые модели в длительных экспериментах с антропогенным форсингом воспроизводят тренд, а другие нет (Osborn, 2004; Stephenson et al., 2006). Для прогноза на два-три десятилетия можно использовать "сценарии" наличия или отсутствия тренда и динамико-стохастические модели (Бардин 2011). Те же динамико-стохастические модели можно использовать, чтобы «расщепить» антропогенный тренд и естественные изменения климата, связанные с модами атмосферной циркуляции. Наиболее известный пример — «избыточное потепление» на западе Северной Евразии в зимний сезон для периода с 1970-х до середины 1990-х, и затем — относительное «похолодание», связанные в значительной мере с долгопериодными (60-70 лет) изменениями САК (Hurrell, J.W., et al., 2003; Climate Change, 2007; Бардин, 2011). Выше показано, что корреляция циркуляционных мод с осадками вполне убедительно объясняется вариациями повторяемости циклонов в различных фазах мод. Корреляция с температурой зимой, по-видимому, в большей степени определяется вариациями среднего зонального переноса, но летом и в ряде случаев зимой может быть важен и перенос тепла (в т.ч., скрытого) циклоническими вихрями. Наличие архива траекторий циклонов и их геометрических характеристик вкупе с данными о температуре, влажности и ветре из массивов реанализа позволяет получить прямые оценки вклада переноса тепла и влаги у поверхности циклонами без использования «макротурбулентных» формул типа и т.п., которые больше подходят для сравнительно мелких и частых «подвижных вихрей» (transient eddies) — по существу, волновых движений синоптического масштаба — в тропосфере. Такие оценки позволяят уточнить относительные вклады антропогенной составляющей и естественной долгопериодной изменчивости в наблюдаемые и ожидаемые региональные изменния климата.

Здесь возникает один из наиболее важных аспектов, связанных с циклонической активностью: изменения повторяемости и величины погодных экстремумов: волн тепла и холода, сильных дождей и засух, штормовых ветров и т. д. Тщательные региональные диагностические исследования, связывающие статистики экстремумов и характеристик циклонической активности являются базой для более надежных сценарных прогнозов экстремальности климата.

Общие изменения циклонической активности при глобальном потеплении могут происходить вследствие изменения ряда параметров климатической системы, таких, как общая бароклинность, радиус дефомации Россби и др. (Held 1993; Trenberth, 1999; Голицын и др., 2007а, б). В частности, имеются основания предполагать возможность изменения очень важных для оценки гидрометеорологических рисков функций распределения характеристик циклонов: так, Held 1993 указывает на возможность роста повторяемости наиболее крупных циклонов. Однако анализ для территории Восточной Европы (25–60°в.д., 40–75°с.ш) показывает, что рост числа крупных циклонов (глубже 150 гпм) наблюдается с середины 1970-х гг. до второй половины 1990-х, в соответствии с долгопериодными изменениями САК (ОД2, гл. 1.7). Поэтому наряду с общими функциями распределения для полушария полезно рассматривать особенности для регионов, где наблюдается значительный отклик на те или иные моды атмосферной циркуляции.

Список литературы

Бардин М.Ю. (1995): Изменчивость характеристик циклоничности в средней тропосфере умеренных широт Северного полушария. — Метеорология и гидрология, 1995, № 11, с. 24–37.

Бардин М.Ю. (1996): Определение режимов зимней циркуляции в умеренных широтах Северного полушария по данным H500 в ключевых регионах. — Метеорология и гидрология, 1996, № 5, с. 29–49. Бардин М.Ю. (2000): Бардин М.Ю. Основные моды изменчивости повторяемости циклонов зимой в атлантическом секторе. — Метеорология и Гидрология, 2000, № 1, с. 42–52.

Бардин М.Ю., Полонский А.Б. (2005): Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период. — Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, том 41, № 2, с. 3–13.

Бардин М.Ю. (2007): Антициклоническая квазистационарная циркуляция и ее влияние на аномалии и экстремумы температуры воздуха в западных областях России. — Метеорология и гидрология, № 2, с. 5–18.

Бардин М.Ю. (2011): Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов РФ до 2030 г. с использованием эмпирических стохастических моделей климата. - Метеорология и гидрология, № 4, с. 5–21.

Блютген И. (1973): География климатов, пер. с нем. А. С. Чаплыгиной; ред. С. П. Хромова, т. 2, Москва, Прогресс, 1973, 400 с.

Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю. (2007а): Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата. Доклады АН, т. 413, № 2, с. 254–256.

Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. (20076): Оценки гидрометеорологических рисков и функций распределения вероятности атмосферных вихрей по данным реанализа и моделям климата. В кн.: Проблемы анализа риска, т. 4, № 1, с. 27–37.

Лоренц Э.Н. (1970): Природа и теория общей циркуляции атмосферы Л., Гидрометеоиздат, 1970, 259 с.

Монин А.С. (1982): Введение в теорию климата. — Л. Гидрометеоиздат, 1982, 246 с.

Нестеров Е.С. (2013): Североатлантическое колебание: атмосфера и океан.– М.: Триада ЛТД, 144 с.

Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С. (1984): Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий. — Метеорология и гидрология, 1984, № 10, с. 5–14.

ОД2 (2014): Второй оценочный доклад Росгидромета Об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва, 2014, 1008 с.

Погосян Х.П. (1952): Общая циркуляция атмосферы. Л., 1952.

Хромов С.П., Мамонтова Л.И. (1974): Метеорологический словарь. Л., Гидрометеоиздат, 568 с.

Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н. (2015): Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней циклично-

сти атмосферных процессов и ее связь с урожайностью в европейской части РФ. — Метеорология и гидрология, 2015, № 3, с. 23–35.

Barnston, A. G., and R. E. Livezey (1987): Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. Mon. Wea. Rev., 115, 1083–1126.

Charney J.G., J. Shukla, K.G. Mo (1981): Comparison of a barotropic blocking theory with observations. — J.Atmos.Sci., 1981, vol. 38. No.4, p. 762–779.

Climate Change (2007): The Physical Science Basis. - S. Solomon et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 pp.

Corti S., F. Molteni, T. N. Palmer (1999): Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes, Nature, vol. 398, pp. 799–802.

Held I.M., (1993): Large-scale dynamics and global warming. Bull. Amer. Meteor. Soc., 74, pp. 228–241.

Held I.M., (1999): The macroturbulence of the troposphere. Tellus, 51A-B, 59–70.

Hurrell, J.W., (1995): Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. — Science: vol. 269, pp.676–679.

Hurrell J. W., H. van Loon (1997): Decadal variations in climate associated with the North-Atlantic Oscillation. — Clim. Change, vol. 36, pp. 301–326.

Hurrell, J.W., et al. (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation.-In: The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact [Hurrell, J.W., et al. (eds.)]. Geophys. Monogr., 134, Amer. Geophys. U., Washington, DC, p. 1–35.

Kalnay, E. et al., (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437–471.

Lau, N.C. (1988): Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern. J. Atmos. Sci., 45, 2718–2743.

Molteni, F., S Tibaldi, and T.N. Palmer (1990): Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. I: Observational evidence. Q. J. R. Meteorol. Soc., 116, 31–67.

Osborn, T.J. (2004): Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. Climate Dynamics 22, 605–623.

Pelly J.L., and J.B.Hoskins (2003): A new perspective on blocking — J.Atmos.Sci. 60, p. 734–755.

Plaut G., Vautard R. (1994): Spells of low-frequency oscillations and weather

regimes in the Northern Hemisphere — J. Atmos. Sci. 1994, Vol.51, № 2, p. 210–236.

Polonsky A., M. Bardin, E. Voskresenskaya (2012): Variability of extratropical cyclonic activity in the Northern Hemisphere associated with global processes in the ocean-atmosphere system. — In book: Cyclones: Formation, Triggers and Control (Editors: Kazuyoshi Oouchi and Hironori Fudeyasu), Nova Science Publishers, Inc., USA-Canada, Chapter 8, 2012, p. 161-196.

Rex D.F. (1950): Blocking action in the middle troposphere and its effect on regional climate II: The climatology of blocking action — Tellus, 1950, 3, p. 275–301.

Starr, V. P. (1968): Physics of negative viscosity phenomena. New York: МсGraw-Hill, 256 р. (русский перевод: Старр В.П. Физика явлений с отрицательной вязкостью, — М., «Мир», 1971).

D. B. Stephenson, V. Pavan, M. Collins, M. M. Junge, R. Quadrelli, Participating CMIP2 Modelling Groups, (2006): North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on European winter climate: a CMIP2 multi-model assessment — Climate Dynamics 27: 401–420.

Trenberth and Hurrell (1994): Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Climate Dynamics 9: 303–319.

Trenberth, K. E. (1999): Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. — Climatic Change, 42(1), p. 327–339.

Wallace, J. M., and D. S. Gutzler (1981): Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter. Mon. Wea. Rev., 109, 784–812.

von Storch H., E. Zorita, U. Cubasch (1993): Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. — J. Climate 6 (6), 1161–1171.