

О ПОТЕПЛЕНИИ В РАЙОНЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

канд. физ.-мат. наук В.Е.ЛАГУН, канд. физ.-мат. наук А.В.КЛЕПИКОВ,
канд. физ.-мат. наук А.И.ДАНИЛОВ, ст. науч. сотр. А.И.КОРОТКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, kler@aari.nw.ru

Рассмотрены процессы потепления в районе Антарктического полуострова. Показано, что заметное региональное потепление в приземном слое и в средней тропосфере сопровождается выхолаживанием в нижней стратосфере, падением приземного давления и внутримесячной дисперсии температуры воздуха, увеличением облачности, сокращением ледового периода, уменьшением толщины морского льда и изменением в местных экосистемах. Рассмотрены возможные причины потепления, связанные с изменениями крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Ключевые слова: Антарктический полуостров, климатическая изменчивость, метеорологические наблюдения, потепление, припай.

Антарктика является составной частью климатической системы Земли. Процессы, протекающие в атмосфере, криосфере и Южном океане, связаны с процессами в других частях планеты и влияют на глобальный климат. Для предсказания будущих изменений климата и оценки антропогенного влияния на изменения, необходимо оценить изменения климатической системы Антарктики. Продолжительность наблюдений лишь нескольких антарктических станций превышает 50 лет, при этом ряды температуры воздуха характеризуются высокой межгодовой изменчивостью. Из-за редкой наблюдательной сети обширные области внутри континента не обеспечены данными. Для большинства станций тренды температуры малы и, как правило, статистически незначимы. Величина и знак трендов сильно зависят от продолжительности периода исследований.

Наиболее значительное изменение климата, а именно, существенное потепление, зарегистрировано в районе Антарктического полуострова. За полвека среднегодовая приземная температура выросла здесь почти на 3 °С, что намного превышает аналогичные величины для других районов Южного полушария [20]. Эти изменения исследовались нами в работах по проектам МПГ 2007/08 «Сбор данных метеорологических измерений в активную фазу МПГ для научных и прикладных исследований» (Comprehensive Meteorological dataset of active IPY Antarctic measurement phase for Scientific and applied Studies – COMPASS), «Воздействие климатических изменений и таяния ледников на прибрежные сообщества Антарктического полуострова» (Impact of Climate induced glacial melting on marine and terrestrial Coastal communities on a gradient along the Western Antarctic Peninsula – CLICOPEN) и «Антарктическая вечная мерзлота и почвы» (Antarctic Permafrost and Soils – ANTPAS).

По проекту COMPASS на основе единого методологического подхода создана база атмосферных данных, включающая результаты приземных и высотных измерений с оценкой полноты исходных данных, прошедших контроль качества с учетом изменения параметров измерительных комплексов. Для этого были собраны результаты срочных наблюдений основных метеоэлементов на станциях

всех стран, проводящих исследования в Антарктике. Был разработан и испытан метод расчета оценок трендов по временным рядам срочных данных, имеющих пропуски измерений, с учетом внутрирядной корреляции [2]. Поддержка Научного комитета по антарктическим исследованиям (SCAR) по проекту READER (Reference Antarctic Data for Environmental Research) обеспечила доступ к архивам данных стран-операторов в Антарктике и унификацию методики первичной обработки синоптической информации [20].

Антарктический полуостров неплохо обеспечен метеорологической информацией – доступны данные 30 пунктов приземных наблюдений за различные периоды в течение 1944–2009 гг., из них 16 проводят круглогодичные измерения. Наиболее полную однородную исходную информацию предоставляют станции Беллинсгаузен (62°12' с.ш., 58°56' з.д., остров Кинг-Джордж (Ватерлоо)), Фарадей/Академик Вернадский (65°15' ю.ш., 64°16' з.д., остров Галиндез.), Эсперанса (63°24' ю.ш., 56°59' з.д., полуостров Тринити), Марамбио (64°15' ю.ш., 56°39' з.д., остров Сеймур) и Ротера (67°34' ю.ш., 68°08' з.д., остров Аделаида). Эти станции показали следующие статистически значимые тенденции роста среднегодовых значений приземной температуры воздуха: Беллинсгаузен (за период 1969–2009 гг.) – $+0,02 \pm 0,02$ °С/год, Фарадей/Академик Вернадский (1951–2009 гг.) – $+0,05 \pm 0,03$ °С/год, Эсперанса (1946–2009 гг.) – $+0,03 \pm 0,01$ °С/год, Марамбио (1971–2009 гг.) – $+0,05 \pm 0,03$ °С/год, Ротера (1971–2009 гг.) – $+0,06 \pm 0,06$ °С/год.

Климат полуострова формируется в результате сложного взаимодействия между атмосферой, океаном и морским льдом. Местные климатические условия зависят от изменений в тропической части Тихого океана, в частности явления Эль-Ниньо – Южное колебание [19]. Индекс Южного колебания рассчитывается как отклонение разности значений атмосферного давления на уровне моря между пунктами Дарвин и Таити от многолетней нормы, нормированное на значение среднеквадратического отклонения данной. Изменения индекса Южного колебания, характеризующего межполушарный массообмен в атмосфере, рассчитаны за период 1950–2009 гг. по данным Австралийского Бюро по метеорологии (<http://www.bom.gov.au>) и показаны на рис. 1а.

Отрицательные значения индекса Южного колебания соответствуют периодам развития Эль-Ниньо, когда температура воды в тропической зоне Тихого океана превышает норму, ослабевают пассаты, сокращается количество облаков и осадков в тропиках и субтропиках Южного полушария и формируется положительная аномалия геопотенциала в средней тропосфере над Западной Антарктикой. Напротив, явление Ла-Нинья характеризуется отрицательной аномалией температуры в тропической зоне Тихого океана, усилением конвективных процессов при формировании тропической облачности, усилением пассатов, высокими положительными значениями индекса Южного колебания и отрицательными аномалиями геопотенциала на уровне 500 гПа к западу от полуострова. Как следует из рис. 1, во время Эль-Ниньо (Ла-Нинья) температура воздуха на станциях Антарктического полуострова, как правило, падает (возрастает).

Помимо явления Эль-Ниньо – Южное колебание, имеющего планетарный масштаб, важную роль в формировании климата Антарктики играет Антарктическая осцилляция. Она является внесезонной структурой крупномасштабной тропосферной циркуляции в умеренных и высоких широтах Южного полушария, характеризует интенсивность циркумполярного массопереноса и описывается параметрами пространственных аномалий приземного давления или геопотенциала в нижней тропосфере.

На рис. 1б представлены межгодовые колебания индекса Антарктической осцилляции, положительные значения которой в последние 30 лет свидетельствуют о преобладании крупномасштабных атмосферных процессов в формировании климатической изменчивости в регионе и в поддержании очага потепления над полуостровом как в приземном слое [4, 5, 7], так и в свободной атмосфере [2, 16]. Отметим, что потепле-

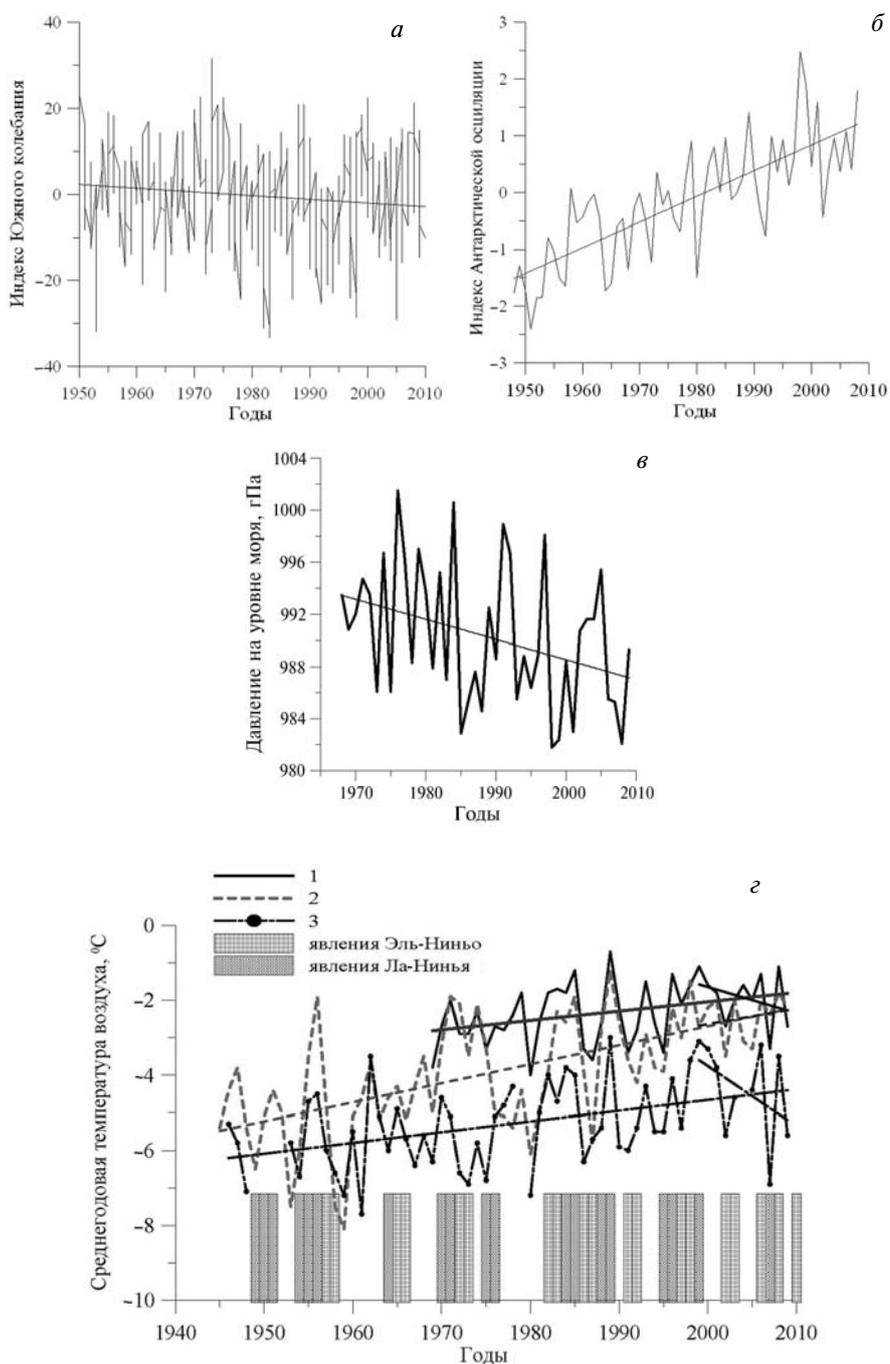


Рис. 1. Межгодовые изменения индексов Южного колебания (а) и Антарктической осцилляции (б), среднегодовых значений давления на уровне моря (в) и приземной температуры (°C) воздуха (г) на станциях Антарктического полуострова Беллинсгаузен (1), Фарадей/Вернадский (2) и Эсперанса (3) и их связь с явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья

ние на западном побережье полуострова связано с устойчивым сокращением ледяного покрова в море Беллинсгаузена, а потепление на восточном побережье связано с наблюдаемым усилением циркулярного атмосферного вихря (увеличением скорости западных ветров) прежде всего в летний сезон, благодаря чему сравнительно теплый воздух может преодолеть меридиональный горный барьер [11].

Как следует из рис. 1г, в начале XXI в. скорость роста приземной температуры в районе полуострова сократилась настолько, что можно говорить о завершении периода локального потепления, причем это согласуется с текущими тен-

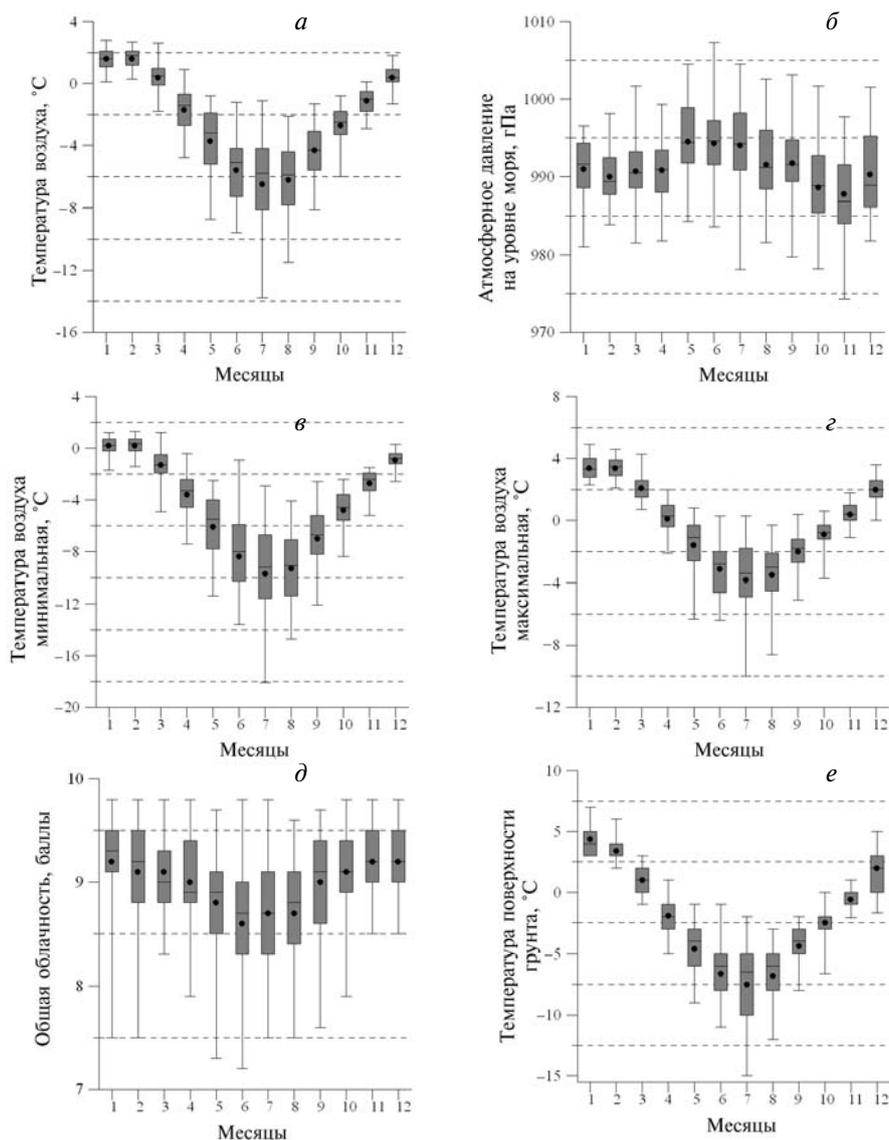


Рис. 2. Квантили многолетнего годового хода приземной температуры воздуха (а), атмосферного давления на уровне моря (б), средней минимальной (в) и средней максимальной (г) температуры, суммарной облачности (д) и температуры поверхности грунта (е) на ст. Беллинсгаузен за период 1968–2009 гг.

денциями уменьшения индекса Антарктической осцилляции (см. рис. 1б) и роста положительных значений индекса Южного колебания (см. рис. 1а).

На рис. 2, 3 приведены основные статистические характеристики приземной температуры воздуха на ст. Беллинсгаузен. Как следует из рис. 2а, наибольшая изменчивость температуры воздуха и суммарной облачности наблюдается в зимний сезон из-за обострения межширотных термических контрастов и усиления синоптической деятельности. Распределение средней минимальной (рис. 2в) и максимальной (рис. 2г) температуры характеризует диапазон колебаний температуры воздуха в регионе.

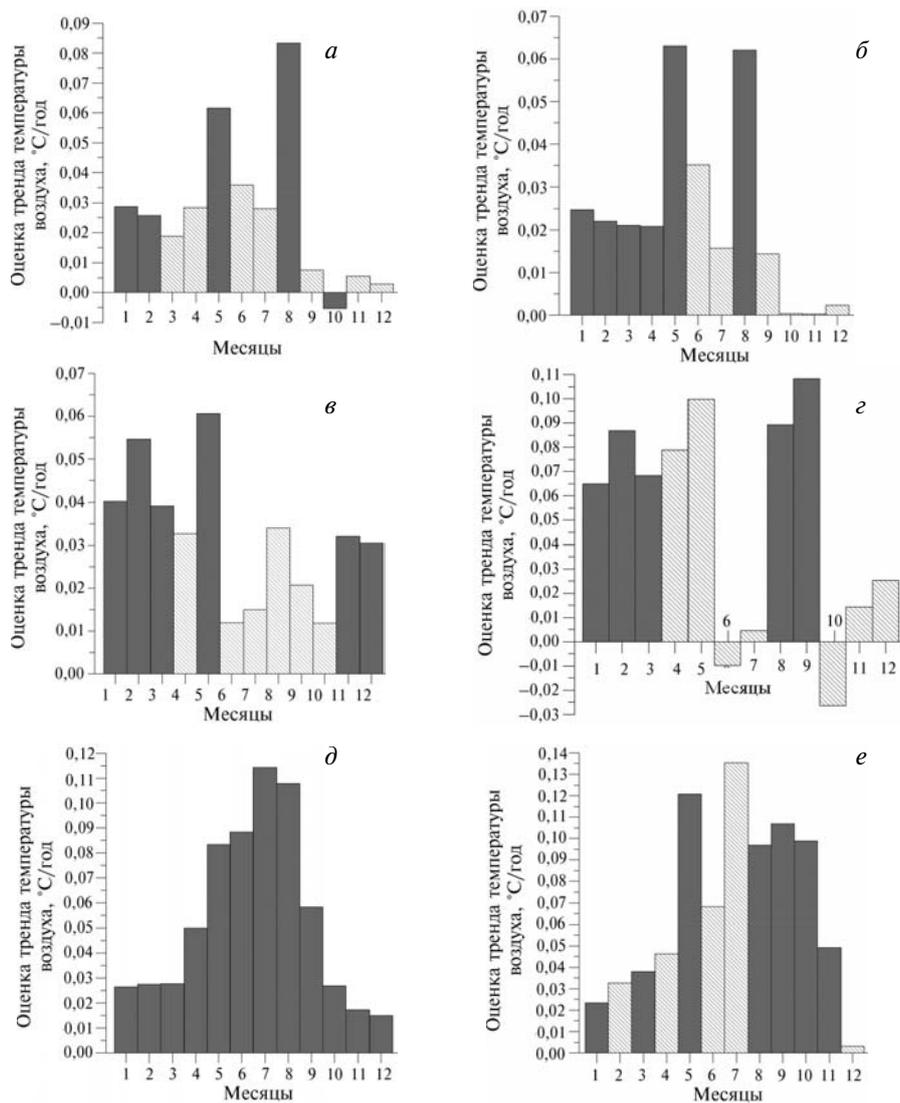


Рис. 3. Внутригодовые изменения оценок линейного тренда приземной температуры воздуха на станциях Антарктического полуострова, имеющих длительные однородные ряды наблюдений: а – Беллинсгаузен (1968–2007 гг.), б – Беллинсгаузен (1968–2009 гг.), в – Эсперанса, г – Марамбио, д – Фарадей/Академик Вернадский, е – Ротера
Статистически значимые оценки трендов отмечены сплошной заливкой

Годовой ход атмосферного давления на уровне моря (рис. 2б) и относительной влажности менее выражен на фоне многолетнего падения атмосферного давления (см. рис. 1в), достигающего $-0,6$ гПа/десятилетие, и роста значений влажности вследствие роста повторяемости мощных внетропических циклонов и усиления средней меридиональной циркуляции в весенне-осенний период. Распределение средней минимальной (рис. 2в) и максимальной (рис. 3з) температуры характеризует диапазон колебаний температуры воздуха в регионе. В районе полуострова также отмечен рост количества облаков, снижение высоты нижней границы облачности, рост водности облачных слоев в тропосфере [10, 12] и увеличение температуры поверхности грунта.

Как известно, оценки трендов для станций, данные которых имеют значительную изменчивость, существенно зависят от периода анализа полноты данных, методов расчета и осреднения. Структура этих оценок (распределение по месяцам года) показана на рис. 3, из которого следует, что на формирование режима потепления влияние оказывают локальные географические условия, например орография.

Сравнение рис. 3а и 3б, описывающих оценки трендов температуры воздуха на ст. Беллинсгаузен для различных периодов анализа, указывает на важность учета устойчивости временных трендов, поскольку зачастую один-два года с различными знаками аномалии температуры могут изменить структуру ее многолетних изменений. Поэтому к таким оценкам следует относиться с осторожностью.

При анализе возможных причин потепления на полуострове необходимо учитывать, что рост приземной температуры воздуха связан прежде всего с повышением минимальных значений температуры. В зимний сезон на ст. Беллинсгаузен оценка тренда межгодовых изменений минимальных значений составляет $0,52$ °С/год, а в летний сезон $-0,33$ °С/год, так что скорость роста минимальной температуры в полтора раза выше скорости роста ее средних значений. При этом максимальная температура за период наблюдений уменьшается зимой ($-0,004$ °С/год) и растет летом ($0,026$ °С/год).

Внутригодовые изменения оценок тренда приземной температуры воздуха на ст. Академик Вернадский (рис. 3д) показывают, что наибольший вклад в рост среднегодовых значений температуры вносит повышение зимних ночных значений температуры. В отличие от других станций полуострова, подверженных влиянию частой сезонной смены воздушных масс, сформированных над Тихим и Атлантическим океанами, географическое положение ст. Академик Вернадский (близость орографического барьера) обуславливает более однородные циркуляционные условия, связанные с динамикой климатического циклона над морем Беллинсгаузена.

Уменьшение во времени амплитуды колебаний температуры воздуха при потеплении наглядно демонстрируется падением ее внутримесячной дисперсии [15]. Как видно из табл. 1, наиболее значительное уменьшение внутримесячной изменчивости температуры воздуха в годовом ходе происходит в августе, в период наибольшего межгодового роста температуры. Указанная особенность процесса потепления (падение внутримесячной дисперсии приземной температуры) на полуострове количественно подтверждает предположение о доминирующей роли крупномасштабных атмосферных процессов (Антарктической осцилляции) в поддержании потепления в регионе.

На рис. 4 показано изменение температуры воздуха в свободной атмосфере над ст. Беллинсгаузен за период зондирования (1968–1999 г.). Рост температуры наиболее значителен в средней (рис. 4б) и верхней (рис. 4в) тропосфере, а падение температуры наблюдается выше тропопаузы (рис. 4з) [14]. Причиной охлаждения нижней стратосферы является, по-видимому, сокращение общего содержания озона в атмосфере [11]. В [16] построен обобщенный ряд аэрологических данных для полуострова на основе данных станций Фарадей (выполняла зондирования с 1956 по 1982 г.), Марамбио, Беллинсгаузен и реанализа. Составной ряд указывает на многолетнюю тенденцию потепления в тропосфере (слой 850–300 гПа) за период 1956–1999 г., достигающую $0,027 \pm 0,022$ °С/год.

Таблица 1

Годовой ход оценки коэффициента линейного тренда приземной температуры воздуха (A_t , °C/год), ее внутримесячной дисперсии (Atd , °C²/год), доли изменчивости, описываемой линейным трендом (D_t и Dtd соответственно) на станции Беллинсгаузен за период 1969–2007 гг.

Месяц	A_t , °C/год	D_t , %	Atd , °C ² /год	Dtd , %
Январь	0,029*	25,9	-0,005	0,2
Февраль	0,026	19,7	-0,015	3,7
Март	0,019	4,9	-0,006	0,1
Апрель	0,028	4,8	-0,028	0,6
Май	0,062	10,5	-0,154	4,9
Июнь	0,036	3,3	-0,215	7,2
Июль	0,028	1,1	-0,112	1,5
Август	0,083	15,7	-0,386	16,6
Сентябрь	0,008	0,2	-0,024	0,1
Октябрь	-0,005	0,2	0,015	0,3
Ноябрь	0,005	0,6	-0,021	2,4
Декабрь	0,003	0,1	0,016	9,5

* Выделены статистически значимые оценки трендов

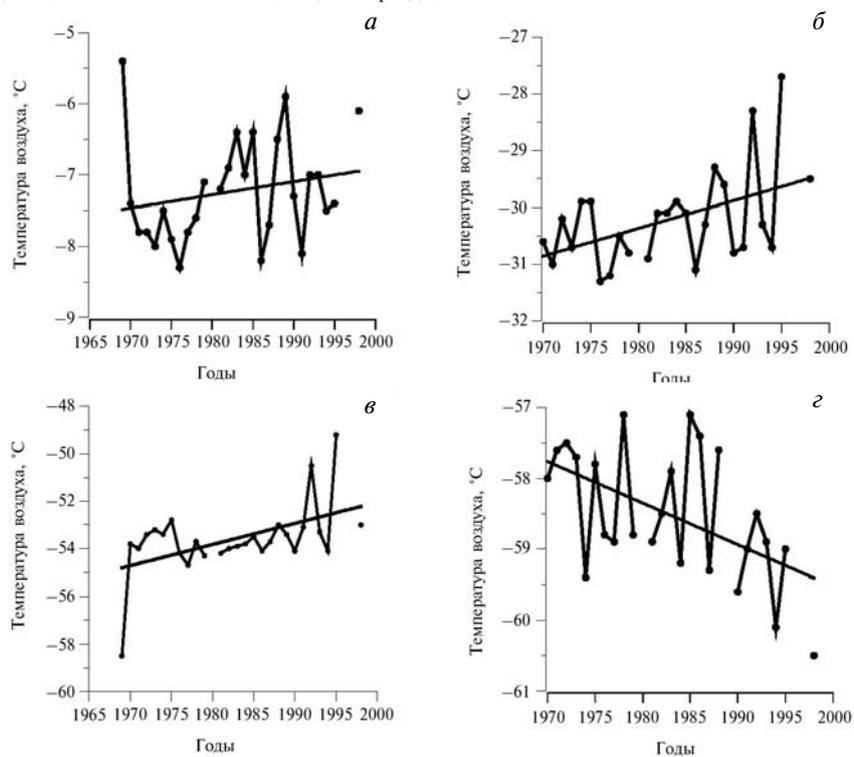


Рис. 4. Межгодовые изменения среднегодовых значений температуры воздуха на уровне 850 гПа (а), 500 гПа (б), 300 гПа (в), 100 гПа (г)

Изменения океанографического и ледового режима также могут поддерживать потепление на западе Антарктического полуострова. Проникновение относительно теплой циркулярной глубинной воды на шельф западного побережья полуострова [11] может способствовать таянию морского льда и, через систему обратных связей в климатической системе, на потепление в атмосфере. Акватории, разделяемые Антарктическим полуостровом, различаются по ледовым условиям. В море Уэдделла к западу от 40° з.д. располагается ядро Атлантического ледяного массива, приуроченного к экстремально холодным водам обширного западного шельфа моря [3]. Оно сложено многолетним льдом толщиной 2 м (в прибрежной зоне – до 4 м и более) [6]. Однолетние льды у тихоокеанского побережья полуострова подстилаются водами круговорота Беллинсгаузена и испытывают отопляющее воздействие циркулярных глубинных вод, которые здесь наиболее близко подходят к континенту. В то же время район Юж. Шетландских островов, в особенности пролив Брансфилд, подвержен сильному влиянию уэдделломорских шельфовых вод. Поступление их в холодный период года, наряду с приносимыми льдами и айсбергами, активизирует процессы местного ледообразования.

Наиболее продолжительным рядом ледовой информации по району Юж. Шетландских островов являются данные прибрежных наблюдений на ст. Беллинсгаузен, находящейся на берегу бухты Ардли в вершине залива Максвелл. Рассмотрим изменения продолжительности ледового периода, определяемого от начала устойчивого ледообразования до окончательного очищения бухты Ардли, по данному ст. Беллинсгаузен за более чем 40 лет наблюдений (рис. 5). В течение первого десятилетия (1968–1978 гг.) происходило плавное сокращение ледового периода, длительность которого обычно достигала полугода. Устойчивое ледообразование начиналось, в среднем, во второй половине мая и сопровождалось быстрым формированием припая, уже через месяц сковывавшего всю бухту Ардли. За три месяца припай в бухте Ардли нарастал до 90 см. Взлом его растягивался на полтора месяца – с конца сентября до середины ноября, когда бухта окончательно очищалась ото льда. Можно считать, что ледовый режим района Юж. Шетландских островов в этот период определялся влиянием уэдделломорских вод.

В период 1979–1995 гг. отмечалось увеличение размаха межгодовых колебаний продолжительности ледового периода, средняя величина которого уменьшилась до 5 месяцев. Нередкими стали случаи, когда не только не происходило полного замерзания бухты Ардли (становления припая на всей ее акватории на срок не менее одного месяца), но и вовсе не образовывался устойчивый припай. В 1989 г. даже процесс ледообразования не получил устойчивого развития, поскольку начался экстремально поздно – 2 сентября. Скоротечно сформировавшийся припай шириной всего около 500 м уже 12 сентября был полностью взломан и в течение последующих суток вынесен из бухты, на акватории которой лед уже больше не появлялся. В 1985 г. очищение бухты Ардли состоялось в еще более ранние сроки – в середине июля.

Вместе с тем более половины из данного ряда лет по продолжительности ледового периода превышало норму. Особо следует отметить 1980 г., когда бухта Ардли была замерзшей в течение 5 месяцев и окончательно очистилась после рекордно позднего взлома припая лишь в начале января следующего года. Одной из причин этого стал заброс в вершину бухты в апреле около 30 фрагментов айсбергов, застрявших на мелководье, вмерзших в припай и в дальнейшем сдерживавших его взлом. Однако решающую роль сыграла общая повышенная ледовитость в районе Юж. Шетландских островов.

С 1989 г. происходило улучшение ледовых условий вдоль всего тихоокеанского побережья полуострова и сокращение ледовитости моря Беллинсгаузена. Ежегодному взлому и выносу стал подвергаться не только припай в заливе Маргерит, но и все крупные участки припая, образующегося у северного и западного побережий Земли Александра I.

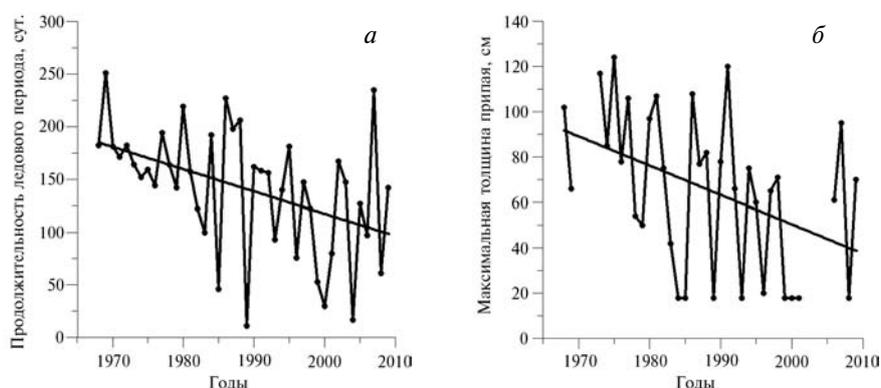


Рис. 5. Межгодовая изменчивость продолжительности ледового периода (а) и максимальной толщины припая (б) в районе станции Беллинсгаузен за период 1968–2009 гг.

В 1996–2006 гг. ледовый период в районе станции Беллинсгаузен ни разу не достигал полугода, сократившись в среднем до трех месяцев. В сравнении с периодом 1968–1978 гг. ледообразование происходило на 1,5 месяца позже, тогда как очищение, напротив, примерно на месяц раньше. Отсутствие окончательного замерзания бухты Ардли практически стало нормой, а в 2004 г. припай вообще не образовался. В среднем припай существовал не более двух месяцев – с августа по сентябрь – и не превышал по толщине 70 см.

В период 1996–2006 гг. наблюдался лишь эпизодический заброс льдов в пролив Брансфилд из моря Уэдделла при возросшем выносе морского льда от оконечности Антарктического полуострова в направлении Юж. Сандвичевых островов из-за усиления западных ветров. В море Беллинсгаузена летом 1999 г. произошло практически полное очищение бассейна ото льда, которое повторилось в 2007 и 2008 гг. Кроме того, вследствие исчезновения буферной зоны многолетнего припая начал подвергаться разрушению шельфовый ледник Уилкинса на Земле Александра I.

Таким образом, ледовые условия в районе Юж. Шетландских островов за последние 40 лет претерпели существенные изменения. Продолжительность ледового периода в бухте Ардли сократилась в среднем с шести до трех месяцев, а толщина образующегося здесь льда уменьшилась с 90 до 30 см.

В наших работах по проекту CLICOPEN были организованы программы мониторинга биоразнообразия на острове Кинг-Джордж [1, 8], что позволило оценить воздействие потепления, таяния морского льда и ледников на эволюцию биологических сообществ. Потепление в районе полуострова способствует росту периода жизнедеятельности экосистем из-за повышения доступности влаги на вновь освобождаемых ото льда территориях, увеличения продолжительности экспозиции грунтов и уровня ультрафиолетовой радиации.

Уменьшение содержания озона в атмосфере наряду с такими факторами, как изменения облачности, аэрозоля, высоты Солнца и альbedo подстилающей поверхности, влияет на режим переноса солнечной радиации, в особенности биологически активной ультрафиолетовой радиации (УФР), влияющей на развитие местных экосистем. В [9] выполнена оценка УФР над районом станции Беллинсгаузен с использованием радиационных моделей атмосферы и спутниковых данных. Показан положительный тренд УФР (4 % за десятилетие) в летний сезон при безоблачном небе вследствие сокращения общего содержания озона. Для облачных условий рост УФР составил 6 % за десятилетие.

Влияние потепления на растительные сообщества Субантарктики изучено в [1] с помощью оценки гумусообразования в литоземах острова Кинг-Джордж, формирующихся

под щучкой антарктической (*Deshampsia antarctica*) и лишайником (*Usnea aurantiaco-atra*). Для всех островных литоземов характерна относительно низкая степень гумификации органического вещества. Поскольку высшие растения способствуют процессу формирования корневых структур, в почвах под щучкой скорость образования гумуса выше, чем в почвах под лишайником. Это выражается в накоплении в почве под щучкой гуминовых и фульвокислот. Дополнительное увлажнение при таянии мерзлых грунтов также способствует более быстрой трансформации органического вещества почв под щучкой. Таким образом, наблюдаемая экспансия высших растений (травы) в регионе в условиях потепления может быть связана и с более быстрой их адаптацией к новым условиям обитания, и с изменением органического состава грунта.

Параметры вечной мерзлоты Антарктиды и субантарктических островов служат надежным индикатором текущих климатических изменений. Российские геокриологические измерения на стационарных полигонах по проекту ANTPAS, начатые в 2006 г., позволили оценить сезонные и межгодовые изменения толщины полуметрового деятельного слоя грунта. Результаты измерений глубины слоя сезонного протаивания на геокриологическом полигоне на острове Кинг-Джордж в 2006–2010 гг. позволяют предположить, что с потеплением происходит переход постоянной вечной мерзлоты к ее спорадической форме.

Новейшие данные палеоклиматических реконструкций, основанные на анализе результатов изотопного анализа ледовых кернов покровных ледников [18], откалиброванных по многолетним рядам прямых метеорологических измерений и океанических донных осадков [17], свидетельствуют о том, что потепление в районе Антарктического полуострова продолжалось не менее 100 лет и привело к существенному сокращению объема и площади более тысячи ледников на полуострове и субантарктических островах, а также к значительному подъему высоты границы питания ледников. С другой стороны, за последние 14000 лет здесь не происходило такого быстрого повышения температуры, которое наблюдалось во второй половине XX в.

ВЫВОДЫ

Получены оценки параметров изменчивости термического режима атмосферы в районе Антарктического полуострова в приземном слое, в толще тропосферы и в нижней стратосфере за пятидесятилетний период инструментальных наблюдений. Продемонстрирована устойчивая тенденция роста приземной температуры воздуха, в тропосфере наблюдается существенное потепление, а нижняя стратосфера выхолаживается. Процессы, которые могут быть причиной потепления, еще не до конца понятны. Связь потепления в районе Антарктического полуострова с уменьшением внутримесячной дисперсии приземной температуры воздуха указывает на ключевую роль крупномасштабной атмосферной циркуляции (Антарктической осцилляции) в формировании потепления в этом районе. Также климатическая изменчивость в этом регионе тесно связана с изменениями, происходящими в тропической части Тихого океана (Эль-Ниньо – Южное колебание). Формирование выраженного сезона таяния в районе Антарктического полуострова, который увеличился с потеплением, имеет значительные экологические последствия, например, в наблюдаемой экспансии высших растений (травы) в регионе.

Авторы признательны Н.Е.Иванову и С.В.Яговкиной за помощь в проведении расчетов статистических характеристик. Работа выполнена в рамках подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики» ФЦП «Мировой океан».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.В., Власов Д.Ю., Горбунов Г.А., Козерецкая И. А., Крыленков В.А., Лагун В.Е., Лукин В.В., Сафронова Е.В. Содержание и состав органического вещества литоземов острова

- Кинг-Джордж, Западная Антарктика // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3, Биология. 2009. Вып. 2. С. 124–137.
2. *Алдухов О.А., Лагун В.Е., Черных И.В., Яговкина С.В.* Об изменении климата в тропосфере над Антарктическим полуостровом // *Problemy Klimatologii Polarnej*. 2006. Vol. 16. С. 7–22.
 3. *Антипов Н.Н., Данилов А.И., Клепиков А.В.* Циркуляция и структура вод западной части моря Уэдделла по данным натурального эксперимента «Дрейфующая станция «Уэдделл-1» // Антарктика: Сб. статей. М.: Наука, 1998. Вып. 34. С. 5–30.
 4. *Данилов А.И., Лагун В.Е.* Полярная метеорология (результаты работ за 2003–2006) // Известия РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 54–61.
 5. *Данилов А.И., Лагун В.Е., Клепиков А.В., Катцов В.М., Вавулин С.В.* Текущие изменения климата Антарктики и сценарии его будущих изменений // Арктика и Антарктика. М.: Наука, 2003. Вып. 2 (36). С. 114–125.
 6. *Коротков А.И.* Основные итоги и перспективы исследований ледового режима Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 1995. Вып. 70. С. 84–103.
 7. *Лагун В.Е., Иванов Н.Е., Яговкина С.В.* К вопросу о потеплении в районе Антарктического полуострова // *Problemy Klimatologii Polarnej*. 2006. Vol. 16. С. 23–45.
 8. *Усов Н.В.* Сезонная динамика обилия зоопланктона в бухте Ардли (остров Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 77. С. 97–108.
 9. *Чубарова Н.Е., Лагун В.Е.* Биологически активная ультрафиолетовая радиация и ее долговременные вариации в районе Антарктического полуострова / Программа и тезисы докладов пятого симпозиума «Метеорологические исследования в Антарктике», ААНИИ, Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2005 г. СПб.: ААНИИ, 2005. С. 55–56.
 10. *Aldukhov O.A., Lagun V.E., Chernykh I.V.* About Cloudiness Low Boundary over Antarctic Peninsula // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation Report (Ed. Ritchie H.). 2003. P. 56–57. URL: www.cmc.ec.gc.ca/rpn/wgne/2003/chapters/02.pdf.
 11. Antarctic Climate Change and the Environment. A contribution to the International Polar Year 2007–2008. / Edited by J. Turner. Scientific Committee on Antarctic Research. Cambridge: Victoria Press, 2009. 526 p.
 12. *Chernykh I.V., Aldukhov O.A., Lagun V.E.* About Climatic Changes of Clouds and Precipitation over Antarctic Peninsula // Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation Report (Ed. Ritchie H.). WMO/TD. 2005. № 35. P. 33–34.
 13. *Hoskins B.J., Karoly D.J.* The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing // Journal of the Atmospheric Sciences. 1981. Vol. 38. P. 1179–1196.
 14. *Jagovkina S.V., Lagun V.E.* Climatology of Antarctic upper-air parameters // Polish Polar Studies. Gdynia, 2004. P. 131–142.
 15. *Lagun V., Ivanov N., Jagovkina S.* Antarctic Peninsula Warming Event: Diagnosis and Possible Causes // MOCA-09, the IAMAS/IAPSO/IACS 2009 Joint Assembly. Montreal, 19th–29th July 2009. www.moca-09.org/f/documents/MOCA-09Program16w.pdf.
 16. *Marshall G.J., Lagun V.E., Lachlan-Cope T.A.* Changes in Antarctic Peninsula tropospheric temperatures from 1956–99: a synthesis of observations and reanalysis data // International Journal of Climatology. 2002. Vol. 22. № 2. P. 291–310.
 17. *Milliken K.T., Anderson J.B., Wellner J.S., Bohaty S.M., Manley P.L.* High-resolution Holocene climate record from Maxwell Bay, South Shetland Islands, Antarctica // Geological Society of America Bulletin. 2009. Vol. 121. № 11–12. P. 1711–1725.
 18. *Thomas, E R., Dennis P.F., Bracegirdle T.J., Franzke C.* Ice core evidence for significant 100-year regional warming on the Antarctic Peninsula // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36, L20704. P. 1–5. doi:10.1029/2009GL040104.
 19. *Turner J.* The El Nio-southern oscillation and Antarctica // International Journal of Climatology. 2004. Vol. 24. № 1. P. 1–31.
 20. *Turner J., Colwell S.R., Marshall J., Lachlan-Cope T., Carleton A.M., Jones P.D., Lagun V.E., Reid P.A., Jagovkina S.* Antarctic climate change during the last 50 years // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25. № 2. P. 279–294.

V.YE.LAGUN, A.V.KLEPIKOV, A.I.DANILOV, A.I.KOROTKOV

ON THE WARMING OVER THE ANTARCTIC PENINSULA

Analysis of warming process over Antarctic Peninsula due to combined atmosphere-ocean-ice interaction is presented. Remarkable regional warming in the near surface air and in the middle atmosphere is accompanied by cooling of low stratosphere, by dropping of surface pressure and intra-monthly air temperature dispersion, by cloudy cover increasing, by shortening of ice cover period, by thinning of sea ice and changing in the local ecosystems. Possible causes of the warming, connected with large scale circulation of the atmosphere and ocean are considered.

Key words: Antarctic Peninsula, climate variability, fast ice, meteorological observations, warming.