

- Влияние изменения климата на экосистемы. Охраняемые природные территории России: анализ многолетних наблюдений, под ред. А. Кокорина, А. Кожаринова, А. Минина, М., Русский университет, ч. 2, с. 16–32.
- Школьник И. М., Мелешко В. П., Катцов В. М., 2006.** Возможные изменения климата на европейской части России и сопредельных территориях к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО, Метеорология и гидрология, № 3, с. 5–16.
- ACIA, Impacts of Warming Arctic, 2004.** Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press.
- Alcamo J., Dronin N., Endejan M., et al., 2003.** Will climate change affect food and water security in Russia?, Summary Report of the International Project on Global Environmental Change and its Threat to Food and Water Security in Russia, Draft 13 February 2003, 25 p.
- Climate Change 2007, 2007.** The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <http://www.ipcc.ch/>.
- Gavrilo M., Bakken V., Firsova L., Kaliakin V., Morozov V., Pokrovskaya I., and Isaksen K., 1998.** Oil vulnerability assessment for marine birds occurring along the Northern Sea Route area, Oslo, The Fridtjof Nansen Institute, INSROP Working Paper No. 97, II-4-2, 50 p.
- Gordon C., Cooper C., and Senior C., et al., 2000.** The simulation of SST, sea-ice extents and ocean heat transfer in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments, Climate Dynamics, vol. 16, pp. 147–168.
- Grace P. R., Colunga-Garcia M., Gage S. H., Robertson G. P., and Safir G. R., 2006.** The potential impact of agricultural management and climate change on soil organic carbon resources in terrestrial ecosystems of the North Central Region of United States, Ecosystems, No. 9, pp. 816–827.
- Grace P. R., Post W. M., and Hennessy K., 2007.** The potential impact of climate change on Australia's soil organic carbon resources, Carbon Balance and Management (submitted).
- Huntly B. and Birks H. J. B., 1983.** An Atlas of Past and Present Pollen Maps for Europe 0–13000 Ear Ago, Cambridge University Press.
- Hutchinson M. F., 2000.** ANUSPLIN Version 4.1 User's Guide, Canberra, Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies.
- Schlesinger W. H., 1999.** Carbon sequestration in soils, Science, No. 284, pp. 2095–2116.
- Venevsky S., 2001.** Broad-scale Vegetation Dynamics in North-Eastern Eurasia — Observations and Simulations, Universität für Bodenkultur, Vienna, 150 p.
- Venevsky S., 2005.** Towards integrated assessment of vulnerability to climate change in Siberian forests: Example of Larch area, Mitigation and Adaptation to Climate Change (MITI) (in print).
- Zokler Ch. and Lysenko I., 1999.** Waterbirds on the edge: Climate change impact on Arctic breeding waterbirds, in: Impacts of Climate Change on Wildlife, Green R. E., Harley M., Spalding M., and Zockler C. (eds.), RSBP/UNEP WCMC Publication, pp. 20–25.

3.7. КОНТИНЕНТАЛЬНАЯ МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА И ЛЕДНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Ведущие авторы: О. А. Анисимов, Ю. А. Анохин, А. Н. Кренке

Авторы: М. Д. Ананичева, П. М. Лурье, Л. Т. Мяч, В. Д. Панов

Редактор-рецензент: А. А. Величко

3.7.1. Вводные замечания

Проблемы перспективных оценок состояния континентальной многолетней мерзлоты (многолетнемерзлые почвогрунты (породы)), ледниковых систем арктических островов и горных ледниковых систем в связи с изменением климата изучаются в рамках многих национальных и международных научных программ. Наиболее крупными являются следующие:

- Климат и криосфера (ВМО);
- программа международного сотрудничества по изучению окружающей среды в Северной Евразии, координируемая со стороны России — РАН и со стороны США — NASA;

— международные программы мониторинга многолетней мерзлоты, а также ряд проектов, намеченных на период проведения Международного полярного года.

Приоритетной задачей всех перечисленных программ является повышение точности описания современного состояния и изменения состояния многолетней мерзлоты на основе синтеза результатов наблюдений и моделирования.

Будущее состояние зоны континентальной многолетней мерзлоты — криолитозоны, а также ледниковых систем арктических островов и горных ледниковых систем представляет значительный практический интерес для стран Северной Евразии, поскольку может существенно влиять, в частности, на хозяйственный режим в Арктике, на несущую способность почвогрунтов, на которых расположены здания и технические сооружения, на доступность водных ресурсов.

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

3.7.2. Перспективные оценки возможных изменений состояния криолитозоны

Для построения перспективных оценок влияния изменений климата на состояние континентальной многолетней мерзлоты применяются математические модели (см. пояснения в разделе 3.1.7). В этих расчетах используются как сценарии изменения климата, рекомендованные МГЭИК, так и построенные независимыми методами. В зависимости от сложности моделей используются разные наборы входных климатических параметров, однако в большинстве случаев достаточно задавать средние месячные значения температуры воздуха и количества осадков.

Увеличение температуры воздуха будет способствовать повышению температуры многолетнемерзлых почвогрунтов и более глубокому сезонному протаиванию. На периферийных участках по достижении некоторой критической глубины протаивания произойдет отрыв мерзлых толщ от поверхности, многолетняя мерзлота перейдет в реликтовую форму, над ней образуется талый слой, толщина которого со временем будет увеличиваться, и над этим слоем возникнет слой сезонного промерзания. В результате произойдет сокращение площади распространения приповерхностной многолетней мерзлоты.

В ряде исследований были даны количественные оценки изменения площади распространения, глубины сезонного протаивания и температуры многолетнемерзлых пород для нескольких сценариев изменения климата в XXI веке (Анисимов, 1989; Анисимов, Скворцов, 1989; Гарагуля, Ершов, 2000; Гречищев, 1997; Молькентин и др., 2001). На основе этих модельных расчетов построены геокриологические карты для отдельных участков криолитозоны (Sazonova and Romanovsky, 2003; Stendel and Christensen, 2002), территории России (Анисимов, 1990; Анисимов, 1994; Аниси-

мов, Нельсон, 1993; Величко, Нечаев, 1992; Ершов, 1997; Малевский-Малевиц и др., 2000; Малевский-Малевиц, Надежина, 2002; Малевский-Малевиц и др., 1999; Израэль и др., 2002; Павлов, 1997; Anisimov, 1989; Malevsky-Malevich et al., 2001) и всего Северного полушария (Анисимов, Нельсон, 1997, 1998; Анисимов и др., 1999; Anisimov and Nelson, 1997; Anisimov et al., 1997). Методы, которыми получены эти оценки, были верифицированы по данным о регрессиях и трансгрессиях многолетней мерзлоты, имевших место на протяжении XX века вслед за периодами потепления 1930-х годов и похолодания 1950-х (Анисимов и др., 2002; Демченко и др., 2002; Anisimov et al., 2002).

В этих работах, в частности, приведены прогнозистические карты распространения многолетней мерзлоты и изменения глубины сезонного протаивания как для России, так и для всей криолитозоны Северного полушария. Как отмечают авторы этих работ, карты получены на основе климатических, геокриологических и почвенных данных, обобщенно характеризующих достаточно большие области. Поэтому необходима их дальнейшая детализация. Вместе с тем можно уже сейчас использовать некоторые полученные результаты для оценки важнейших последствий деградации многолетней мерзлоты и разработки мер по адаптации к ним (Воробьев, 2004; Израэль и др., 2007).

На рис. 3.7.1 приведена карта возможных изменений многолетней мерзлоты на территории России к 2020 г. и к 2050 г. вследствие изменения климата (Ершов, 1997). На карте представлены область *повсеместного* оттаивания для разных типов ландшафтов. При этом рассматривался климат будущего, соответствующий сценарию антропогенного воздействия на глобальный климат IS92 (Climate Change 1994, 1995; Climate Change 1995, 1996), — температура на рассматриваемой территории менялась по этому сценарию.

Таблица 3.7.1. Современная и ожидаемая в 2050 г. площадь приповерхностной многолетней мерзлоты (млн. км² и % современной площади (в скобках)) в Северном полушарии (СП) и в Евразии (ЕА), (Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999; Анисимов и др., 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2003)

Географическая область, условия климата	Общая площадь	Площадь по отдельным зонам		
		сплошная	прерывистая	островная
СП, современный климат	26,9	8,7	6,1	12,1
СП, GFDL	23,6 (88)	8,3	5,1	10,3
СП, ECHAM	24,2 (90)	7,9	5,7	10,6
СП, HadCM	22,4 (83)	8,0	8,5	5,9
ЕА, современный климат	16,7	5,9	4,3	6,5
ЕА, GFDL	13,8 (83)	5,5	3,6	4,8
ЕА, ECHAM	14,6 (87)	5,4	4,0	5,2
ЕА, HadCM	13,1 (78)	5,4	3,6	4,1

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

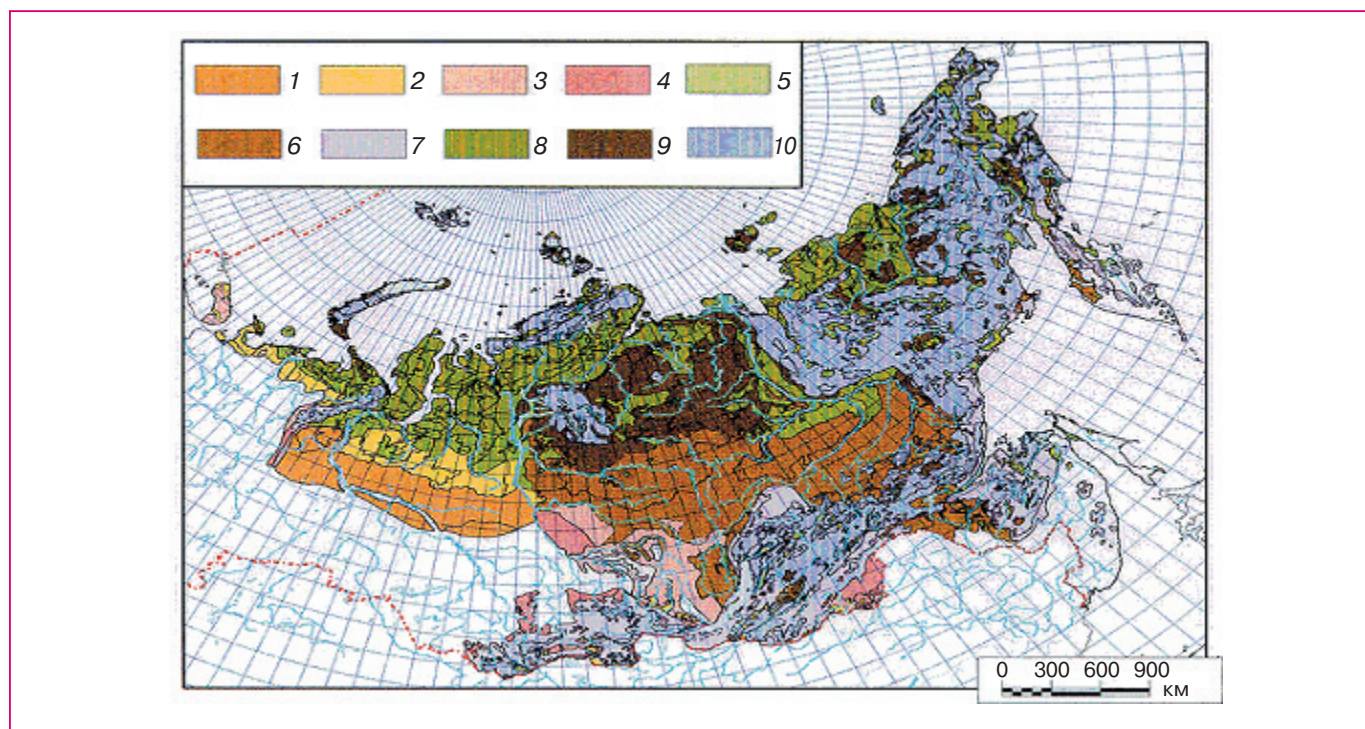


Рис. 3.7.1. Возможные изменения многолетней мерзлоты на территории России к 2020 и 2050 гг. вследствие изменения климата. 1 — повсеместное оттаивание к 2020 г. на равнинах; повсеместное оттаивание к 2050 г.: 2 — на равнинах; 3 — на плоскогорьях; 4 — в горах. Частичное оттаивание к 2050 г.: 5 — на равнинах; 6 — на плоскогорьях; 7 — в горах. Относительно стабильное состояние: 8 — на равнинах; 9 — на плоскогорьях; 10 — в горах. Границами внутри цветных контуров показаны территории с разными проявлениями мерзлотных процессов при потеплении климата (Ершов, 1997).

В табл. 3.7.1 приведены перспективные оценки площади распространения приповерхностной многолетней мерзлоты к середине XXI века, полученные в работах (Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999; Анисимов и др., 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2003) с использованием нескольких альтернативных моделей изменения климата (GFDL, ECHAM, HadCM) и сценария B2. В таблице представлены соответствующие диапазоны ожидаемых изменений температуры верхнего слоя многолетнемерзлых пород и глубины сезонного протаивания.

Обобщенная характеристика соответствующих изменений приповерхностной температуры многолетней мерзлоты ($\Delta T_{\text{п}}$) и глубины сезонного про-

таивания (ΔZ) к середине XXI века по крупным регионам приведена в табл. 3.7.2 (Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999, 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2003). Согласно этим оценкам, температура многолетней мерзлоты увеличится на 1–2°C; для глубины сезонного протаивания оценки менее определены: 10–50%.

Судя по существующим модельным оценкам, смещение к северу границ южной границы криолитозоны к середине XXI века составит от 100 до 200 км (Мелешко и др., 2004). При сохранении наблюдающейся в настоящее время в Западной Сибири интенсивности оттаивания многолетнемерзлых пород (до 4 см/год) через 20–25 лет граница криолитозоны может сдвинуться на 30–

Таблица 3.7.2. Ожидаемые к середине XXI века региональные изменения приповерхностной температуры многолетней мерзлоты ($\Delta T_{\text{п}}$) и глубины сезонного протаивания (ΔZ) (Анисимов, Нельсон, 1998; Анисимов и др., 1999, 2002; Анисимов, Белолуцкая, 2003)

Регион	$\Delta T_{\text{п}}$, °C	ΔZ , %
Север Скандинавии	1,0–2,0	10–20
Западная Сибирь	1,5–2,0	15–25
Якутия	1,5–2,0	25–50
Чукотка и Дальний Восток	1,0–2,0	40–50

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

Таблица 3.7.3. Среднегодовые значения температуры ($^{\circ}\text{C}$) воздуха в приповерхностном слое атмосферы T и грунта на глубине 160 см T_{160} для базового периода 1961–1990 гг. и перспективные оценки их приращений ΔT и ΔT_{160} ($^{\circ}\text{C}$) к 2020 г.

Станция	Величина	Среднее значение за 1961–1990 гг., $^{\circ}\text{C}$	Оценки изменений к 2020 г., $^{\circ}\text{C}$			
			экстраполяция данных	Модель		
				HadCM3	CGCM2	ESNAM
Ханты-Мансийск	T	–1,5	1,7	–3,2	1,0	0,7
	T_{160}	4,5	1,3	–1,0	0,4	0,3
Тура	T	–9,2	1,8	0,3	2,7	1,8
	T_{160}	–0,6	1,5	0,1	1,6	1,1
Жиганск	T	–11,4	0,9	0,0	0,9	0,2
	T_{160}	–0,9	2,5	0,4	1,5	0,0
Якутск	T	–9,9	2,2	1,6	–0,6	2,0
	T_{160}	–1,1	2,2	0,5	–0,2	1,1
Витим	T	–5,1	1,5	–2,5	1,0	0,6
	T_{160}	3,3	1,2	–1,1	0,5	0,3
Мама	T	–4,2	1,2	–3,1	–0,2	–0,6
	T_{160}	4,0	1,3	–2,0	–0,2	–0,4
Могоча	T	–4,9	1,3	–0,8	0,9	2,7
	T_{160}	–0,2	1,1	–0,7	0,8	2,3
Магадан	T	–3,3	1,1	–1,7	0,5	0,7
	T_{160}	–0,2	1,4	–0,3	0,3	0,4

80 км к северу, а к 2050 г. — на 150–200 км (Воробьев, 2004).

Наряду с оценками возможных изменений состояния континентальной многолетней мерзлоты в масштабах континентов и обширных регионов выполнялись также перспективные оценки для пунктов расположения конкретных метеорологических станций. Это дало возможность вовлечь в анализ не только результаты расчетов климата будущего с помощью разных МОЦАО с довольно низким пространственным разрешением (обычно не более 1°), но и данные долгосрочных наблюдений за состоянием климата и многолетней мерзлоты, полученные на этих станциях, а также соответствующие установленные корреляционные зависимости.

Так, в работах (Израэль и др., 2007) были исследованы возможные изменения температуры почвогрунтов на глубине 160 см (T_{160}) к 2020 г. Анализ проводился в рамках сценария А2 с использованием результатов расчета изменения температуры воздуха T в приповерхностном слое атмосферы с помощью трех МОЦАО — HadCM3, CGCM2, ESNAM. Для восьми географических

пунктов (Ханты-Мансийск, Тура, Жиганск, Якутск, Мама, Витим, Могоча, Магадан) были построены перспективные оценки температуры воздуха путем интерполяции с ближайших узлов расчетной сетки моделей. Далее изменения во времени этих интерполированных значений температуры воздуха были конвертированы в изменения температуры почвогрунтов на глубине 160 см с помощью коэффициента линейной регрессии (см. раздел 2.7). Результаты расчета T_{160} на 2020 г. представлены в табл. 3.7.3.

Кроме того, для этих же географических пунктов были выполнены экстраполяционные расчеты (использована линейная регрессия температуры на время, см. табл. 2.7.1) для T и T_{160} . Среднегодовые значения этих величин для базового периода 1961–1990 гг., а также их расчетные приращения к 2020 г. также представлены в табл. 3.7.3.

Как можно заметить из сравнения табл. 3.7.2 и 3.7.3, оценки ожидаемых изменений температуры почвогрунтов на разных глубинах существенно различаются. Кроме того, оценки T_{160} , полученные с помощью разных МОЦАО в рамках одного и того

же сценария антропогенного воздействия на глобальный климат (табл. 3.7.3), очень сильно варьируют.

По-видимому, современные МОЦАО пока непригодны для получения перспективных оценок температурного режима почвогрунтов в большом масштабе для конкретных географических пунктов; они применимы лишь для получения обобщенных региональных оценок. В дальнейшем наиболее реалистичные перспективные оценки состояния континентальной многолетней мерзлоты в условиях меняющегося климата могут быть получены с помощью детализированных региональных моделей климатической системы, для которых изменения климата, рассчитываемые с помощью МОЦАО, должны служить в качестве входной информации, а именно, заданных значений региональных средних для модельных переменных.

3.7.3. Влияние деградации многолетней мерзлоты на эмиссию диоксида углерода и метана в атмосферу

Изменения многолетней мерзлоты могут иметь как региональные, так и глобальные последствия. К последним можно отнести воздействие на глобальную климатическую систему посредством усиления эмиссии парниковых газов из многолетнемерзлых грунтов. Потенциально такая дополнительная эмиссия может приводить к увеличению содержания этих газов в атмосфере и, как следствие, к усилению парникового эффекта.

Содержание углерода в многолетнемерзлых почвах оценивается для всего мира в 455 Гт С (около 14% всего почвенного углерода), а для территории России — в 214 Гт С, при этом около 50 Гт С содержат многолетнемерзлые арктические болота (Анисимов и др., 2005). По имеющимся оценкам, в области распространения многолетнемерзлых пород современный баланс углеродного газообмена в форме диоксида углерода незначительно отличается от нулевого; при этом тундровые почвы являются нетто-источником метана, концентрация которого в атмосфере ежегодно увеличивается на 0,5% (Яговкина и др., 2003; Израэль и др., 2007).

Среди природных источников велика роль эмиссии метана из болот и с переувлажненных территорий. Современная годовая эмиссия метана из бореальных болот на территории Западной Европы составляет около 10,5 млн. т, на территории России 24–33 млн. т, в том числе в Западной Сибири — около 22,2 млн. т (Паников и др., 1996, 1997). Относительно сухие незаболоченные арктические почвы выделяют мало метана — от 0,6 до 11 мг/м² в сутки и периодически из источника становятся нетто-стоком атмосферного метана со значениями, достигающими 0,5–3,0 мг/м² в сутки (Whalen et al., 1991; Whalen and Reeburgh, 1992).

Большая часть болот России расположена в криолитозоне. Почвы мерзлотной зоны выделяют значительно больше метана, чем почвы за пределами криолитозоны (Паников и др., 1996), хотя результатов наблюдений по последним значительно больше. В криолитозоне наиболее интенсивная эмиссия метана наблюдается из следующих типов почв: REGOSOLS — 9094,2 кг CH₄/км² в год (119 мг CH₄/м² в сутки), HISTOSOLS — 6779,4 кг/км² в год (11,7–356,9 мг/м² в сутки), GLEISOLS — 1735 кг/км² в год (от –0,5 до 28–123 мг CH₄/м² в сутки); по предварительным оценкам, суммарная эмиссия метана с поверхности почв криолитозоны России составляет около 20 млн. т в год (Паников и др., 1996). Эмиссия CH₄ с поверхности немерзлых почв составляет около 4 млн. т в год.

Изменение климата в XXI веке окажет влияние на эмиссию метана с земной поверхности в атмосферу на территории России (Анисимов и др., 2005). К середине XXI века эмиссия метана в результате увеличения глубины сезонного протаивания и температуры многолетнемерзлых болот может вырасти вблизи Арктического побережья более чем на 80%, а на большей части прерывистой криолитозоны — на 30–50%. На востоке и юго-востоке криолитозоны, где сосредоточена большая часть многолетнемерзлых болот России, эмиссия метана увеличится не более чем на 20%. В итоге суммарное годовое нетто-поступление метана из многолетнемерзлых болот на территории России в атмосферу может увеличиться на 6–10 млн. т (Анисимов и др., 2005). Это увеличение сопоставимо с современным глобальным годовым нетто-поступлением метана в атмосферу, равным 30 млн. т: эмиссии от всех источников составляют 610 млн. т, а сток 580 млн. т обусловлен химическим разрушением метана в атмосфере и микробиологическим в почве (Climate Change 2001, 2001, p. 244).

До недавнего времени значительные неопределенности были связаны с оценкой того, как изменения многолетней мерзлоты могут повлиять на глобальный климат. Основным действующим фактором является эмиссия парниковых газов при увеличении температуры и глубины сезонного таяния многолетнемерзлых грунтов, в особенности в арктических болотах, где имеется значительное количество органического вещества и из-за высокого уровня грунтовых вод созданы условия для производства метана. Метан по своему воздействию на климат более чем в 20 раз превышает парниковый эффект равного количества диоксида углерода. В связи с этим неоднократно высказывались опасения, что таяние арктических болот в Сибири может привести к сильному увеличению содержания метана в атмосфере, в результате чего заметно возрастет глобальная температура.

В одной из недавних работ было показано, что эти опасения преувеличены (Anisimov, 2007).

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

Были собраны данные о географическом распределении и размерах арктических болот на территории России, после чего с использованием моделей многолетней мерзлоты и углеродного цикла были рассчитаны возможные изменения эмиссии метана для нескольких климатических сценариев. Результаты показали, что к середине XXI века эмиссия метана из арктических болот на территории России может увеличиться на 6–8 млн. т в год. При том, что эффективное время жизни молекулы метана в атмосфере составляет приблизительно 12 лет, это вызовет увеличение равновесной атмосферной концентрации не более чем на 100 млн. т или же на $0,04 \text{ млн}^{-1}$. В результате радиационного воздействия такого количества метана средняя годовая глобальная температура воздуха может к середине XXI века дополнительно увеличиться на $0,012^\circ\text{C}$, что малозначительно по сравнению с воздействием других факторов.

3.7.4. Горное оледенение

3.7.4.1. Большой Кавказ

Для современных условий для северного и южного склонов, а также для Большого Кавказа в целом получена достаточно тесная зависимость изменения площади оледенения от изменения температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, а также от размеров исходного оледенения (Панов, 1993). Чтобы рассчитать возможное изменение размеров оледенения в будущем, необходимо знать не только размеры оледенения на начальный момент или период, но и принять определенные предположения о значениях элементов климата в будущем, т. е. сценарий изменения климата.

Согласно расчетным данным, приведенным в работах (Борзенкова и др., 1987; Жуков, Святкина, 2000), для разных существующих сценариев изменения климата в 2020–2050 гг. увеличение температуры воздуха за период абляции составит $1,0\text{--}5,5^\circ\text{C}$, а суммы атмосферных осадков за период аккумуляции 5–45%.

В работе (Лурье, 2002) для расчетов будущего изменения площади оледенения Большого Кавказа были приняты следующие значения изменений

климатических параметров по сравнению с современными (конец XX века): температура воздуха за период абляции повысится на $2,4^\circ\text{C}$ к 2020 г. и на $3,0^\circ\text{C}$ к 2050 г.; атмосферные осадки за период аккумуляции увеличатся к 2020 г. на 11% и к 2050 г. на 23%. Используемые оценки современного оледенения приведены в разделе 2.7.

Расчеты, проведенные при этих предположениях, показали, что в 2000–2050 гг. площадь оледенения Большого Кавказа будет сокращаться и в течение этого периода уменьшится на $371,3 \text{ км}^2$, или 30% по отношению к современному уровню. Результаты представлены в табл. 3.7.4.

Как следует из данных табл. 3.7.4, в 2000–2050 гг. будет происходить уменьшение площади оледенения, причем на обоих склонах Большого Кавказа (т. е. современная тенденция сохранится). При этом к 2050 г. на северном склоне площадь сократится на 35%, а южном — на 18%. Наибольшая скорость сокращения будет характерна для северного склона — в среднем $6,0 \text{ км}^2/\text{год}$ в 2000–2050 гг., в то время как для южного склона она будет заметно меньше — $1,4 \text{ км}^2/\text{год}$. Скорости уменьшения площади оледенения не будут постоянными. На северном склоне скорость с $7,1 \text{ км}^2/\text{год}$ в 2000–2020 гг. сократится до $5,3 \text{ км}^2/\text{год}$ за 2020–2050 гг., в то время как на южном склоне она увеличится соответственно с 1,1 до $1,6 \text{ км}^2/\text{год}$.

Одновременно с уменьшением площади оледенения произойдет изменение числа ледников: в западной и восточной частях Большого Кавказа будет происходить исчезновение ледников, в то время как в центральной части оно будет увеличиваться, поскольку здесь будет продолжаться процесс отчленения притоков и распадение единых ледников на части.

В связи с уменьшением площади оледенения к 2050 г. произойдет уменьшение ледникового стока, который сократится за 2000–2050 гг. на $0,85 \text{ км}^3/\text{год}$, или на 32%. На северном склоне за 2000–2050 гг. сокращение будет почти в два раза больше, чем на южном, — 39 и 21% соответственно. Это связано с менее благоприятными климатическими условиями для существования там оледенения.

Таблица 3.7.4. Уменьшение площади оледенения Большого Кавказа за 2000–2050 гг. (Лурье, 2002)

Район	2000–2020 гг.		2020–2050 гг.		2000–2050 гг.	
	в целом за период, км^2	в среднем за год, $\text{км}^2/\text{год}$	в целом за период, км^2	в среднем за год, $\text{км}^2/\text{год}$	в целом за период, км^2	в среднем за год, $\text{км}^2/\text{год}$
Северный склон	142,2	7,1	159,2	5,3	301,4	6,0
Южный склон	22,8	1,1	47,1	1,6	69,9	1,4
Большой Кавказ	165,0	8,2	206,3	6,9	371,3	7,4

3.7.4.2. Возможные изменения горных ледниковых систем на северо-востоке России

Ниже приводится перспективная оценка климатогенных изменений в ледниковых системах северо-востока Сибири (7 систем) и п-ова Камчатка (10 систем), соответствующих одному из максимальных сценариев антропогенного потепления. Расчеты изменения климата выполнялись с помощью модели ЕСНАМ4/ОРУС3 в версии Ga1.

Эти ледниковые системы представляют широкий спектр типов — от малых каровых ледников Орулгана до крупных дендритовых и сложно-долинных ледников Буордахского массива, хребта Черского и специфических морфологических типов на вулканах Камчатки. Условия питания оледенения также различны — от обильного муссонного в восточных частях Камчатки (Кроноцкий хребет) до недостаточного — юго-восток Орулгана. Хребты Черского и Сунтар-Хаята находятся в промежуточном положении по уровню питания ледников. Соответственно реакция этих систем на потепление различна.

В условиях выбранного сценария изменения климата в XXI столетии увеличение средней температуры лета составит от 3,1 до 3,8°C, что намного превосходит температурные различия между 30-летними периодами XX столетия; для северо-востока Сибири пространственные особенности аномалий летней температуры и твердых осадков исследованы в работах (Ананичева, Кренке, 2005, 2007). Для оценки аккумуляции полученные с помощью климатической модели значения суточной суммы осадков были пересчитаны в среднемесячные значения суммы твердых осадков. Для этого был использован метод Э. Г. Богдановой (Богданова, 1976).

Далее были оценены изменения суммы твердых осадков, исходя из начальных значений температуры и ее ожидаемых изменений в течение XXI века.

При рассматриваемом сценарии изменения климата на северо-востоке Сибири твердые осадки увеличатся везде, кроме южного массива Сунтар-Хаята. На Камчатке ожидается, напротив, некоторое уменьшение твердых осадков везде, за исключением юго-востока, где они слегка увеличатся.

В отношении границы питания получены следующие перспективные оценки: наименьший ее подъем ожидается в северных частях Сибири — 320 м против 500 м на юге. На Камчатке ее повышение, как правило, в большей степени зависит от осадков. Наибольший подъем границы питания ожидается на расположенном на юге полуострова Ичинском вулкане, находящемся в “дождевой тени” Срединного хребта (на 1210 м). Площадь оледенения в рассматриваемом регионе уменьшится дифференцированно: до нуля — полное исчезновение малых ледниковых систем, с сохранением 70% площади — Ключевская группа вулканов,

половины площади оледенения — вулканы Шивелуч и Толбачек. При рассматриваемом сценарном потеплении ледники не будут покрывать южные системы северо-востока Сибири — южный очаг оледенения Орулгана и Сунтар-Хаята; на Камчатке ледники исчезнут с невысоких хребтов Тумрок и Гемчен, а также с хребта Валагинского, которые в отличие от также невысокого Кроноцкого хребта (где останется 10% современной площади) не будут получать достаточного количества влаги для ледникового питания, и при резком потеплении абляция здесь сильно превысит аккумуляцию. Примерно треть площади ледников останется на хребте Черского, на севере Орулгана и Сунтар-Хаята, на Срединном хребте Камчатки (они перечисляются по убыванию процента сохраняющейся площади ледников) и вокруг Ичинского вулкана. Имеющие хорошее питание ледники, окаймляющие сопки юго-востока Камчатки, из-за высоты конусов и близости к Тихому океану сохранят более 40% своей площади, а в Ключевской группе — более 70%.

Судя по балансу массы ледников, как в базовом периоде времени (примерно 1940–1990 гг.), так и в XXI веке рассматриваемые ледниковые системы оказываются в разной степени соответствия текущему и ожидаемому климатам. В базовый период среди рассматриваемых ледниковых систем только оледенение хребта Черского было в равновесии с климатом. Оледенение Орулгана, западного склона Срединного хребта, Ключевской Сопки и Толбачека на Камчатке в это время увеличивалось, остальные — уже убывали. К 2040–2069 гг. оледенение севера Орулгана, вулканов Ключевской группы и Толбачека (а в случае отсутствия сноса — и Ичинского) придут в соответствие с климатом. Оледенение хребта Черского, несмотря на ожидаемое сильное потепление, все также останется в равновесии с климатом. Отступление ледников Срединного и Кроноцкого хребтов, вулканов Шивелуч и юго-востока Камчатки ускорится (Ананичева, Кренке, 2007).

3.7.5. Литература

- Ананичева М. Д., Кренке А. Н., 2007. Горное оледенение (на примере северо-востока Сибири и Камчатки), глава 6. Оледенение Северной Евразии в ближайшем будущем, в кн.: Оледенение Северной и Центральной Евразии: от прошлого к ближайшему будущему, М., Наука (в печати).
- Ананичева М. Д., Кренке А. Н., 2005. Эволюция высот климатической снеговой линии и границы питания ледников на северо-востоке Сибири в XX веке, Материалы гляциологических исследований, вып. 98, с. 225–233.
- Анисимов О. А., 1989. Об оценке чувствительности вечной мерзлоты к изменению глобального

3. ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В XXI В.

- термического режима земной поверхности, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 79–84.
- Анисимов О. А., 1990.** Оценка влияния ожидаемых изменений климата на режим вечной мерзлоты, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 40–46.
- Анисимов О. А., 1994.** Оценка макроклимата криолитозоны Евразии и распространение вечной мерзлоты в условиях глобального потепления, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 12–19.
- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., 2003.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту: прогноз и оценка неопределенности, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, СПб, Гидрометеиздат, т. XIX, с. 21–38.
- Анисимов О. А., Величко А. А., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Мохов И. И., Нечаев В. П., 2002.** Влияние изменений климата на вечную мерзлоту в прошлом, настоящем и будущем, *Физика атмосферы и океана*, т. 38, № 1, с. 25–39.
- Анисимов О. А., Лавров С. А., Ренева С. А., 2005.** Эмиссия метана из многолетнемерзлых болот России в условиях изменения климата, в кн.: Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, СПб, Гидрометеиздат, т. XX, с. 124–142.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., 1993.** Зональность криолитозоны России в условиях антропогенного изменения климата, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 87–93.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., 1997.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 71–80.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., 1998.** Прогноз изменения мерзлотных условий в Северном полушарии: применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы, *Криосфера Земли*, т. 2, № 2, с. 53–57.
- Анисимов О. А., Нельсон Ф. Э., Павлов А. В., 1999.** Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке, *Криосфера Земли*, т. 3, № 4, с. 15–25.
- Анисимов О. А., Скворцов М., 1989.** О применении математических моделей для исследования влияния изменения климата на вечную мерзлоту, *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 98–103.
- Богданова Э. Г., 1976.** Способ расчета доли твердых, жидких и смешанных осадков в их месячной норме, *Материалы гляциологических исследований*, вып. 26, с. 202–207.
- Борзенкова И. И., Будыко М. И., Бютнер Э. К., Величко А. А., Винников К. Я., Голицын Г. С., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Кобак К. И., Кузьмин И. И., Легасов В. А., Менжулин Г. В., 1987.** Антропогенные изменения климата, Л., Гидрометеиздат, 406 с.
- Величко А. А., Нечаев В. П., 1992.** К оценке динамики вечной мерзлоты Северной Евразии в условиях глобального изменения климата, *Известия РАН*, № 3, с. 667–671.
- Воробьев Ю. Л., 2004.** Изменение климата и чрезвычайные ситуации на территории России, в кн.: Труды Всемирной конференции по изменению климата, Москва, 29 сентября — 3 октября 2003, М., Новости, с. 323–327.
- Гарагуля Л. С., Ершов Э. Д. (ред.), 2000.** Геокриологические опасности. Природные опасности России, т. 1, М., Крук, 315 с.
- Гречищев С. Е., 1997.** Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата, *Криосфера Земли*, т. 1, № 1, с. 59–65.
- Демченко П. Ф., Величко А. А., Елисеев А. В., Мохов И. И., Нечаев В. П., 2002.** Зависимость условия распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеореконокструкций, *Физика атмосферы и океана*, т. 38, № 2, с. 165–174.
- Ершов Э. Д., 1997.** Деградация мерзлоты при возможном глобальном потеплении климата, *Соровский образовательный журнал*, № 2, с. 70–74.
- Жуков В. А., Святкина О. А., 2000.** Стохастическое моделирование и прогноз агроклиматических ресурсов при адаптации сельского хозяйства к региональным изменениям климата на территории России, *Метеорология и гидрология*, № 1, с. 100–109.
- Израэль Ю. А., Семенов С. М., Эскин В. И., 2002.** Имитационная модель для оценки влияния усиления парникового эффекта на сезонный ход температуры в приповерхностном слое литосферы, в кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, СПб, Гидрометеиздат, т. XVIII, с. 9–22.
- Израэль Ю. А., Анохин Ю. А., Мяс Л. Т., Шерстюков А. Б., 2007.** Оценка и прогноз возможного изменения климата и состояния вечной мерзлоты на территории Российской Федерации в XXI веке, в кн.: Международная конференция “Криогенные ресурсы полярных регионов”, Салехард, 17–22 июня 2007 г., Салехард, Материалы, т. 1, с. 127–132.
- Израэль Ю. А., Егоров В. И., Парамонов С. Г., 2007.** Фоновое содержание и тенденции изменений диоксида углерода и метана в атмосфере северных районов Северного полушария, в кн.: Проблемы экологического моделирования и мониторинга экосистем, СПб, Гидрометеиздат, с. 9–22.
- Лурье П. М., 2002.** Водные ресурсы и водный баланс Кавказа, СПб, Гидрометеиздат, 506 с.
- Малевский-Малевич С. П., Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., 2000.** Модельные оценки эволю-

- ции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири, Криосфера Земли, т. 4, № 4, с. 49–57.
- Малевский-Малевиц С. П., Надежина Е. Д., 2002.** Оценки влияния изменений климата на вечную мерзлоту в России, основанные на модельных сценариях изменений климата, в кн.: Г. В. Менжулин (ред.), Изменения климата и их последствия, СПб, Наука, с. 231–239.
- Малевский-Малевиц С. П., Надежина Е. Д., Симонов В. В., Шкляревич О. Б., Молькентин К. К., 1999.** Оценки воздействий изменений климата на режим протаивания многолетнемерзлых грунтов, в кн.: М. Е. Берляндт, В. П. Мелешко (ред.), Современные исследования главной геофизической обсерватории, СПб, Гидрометеоиздат, с. 33–51.
- Мелешко В. П., Голицын Г. С., Говоркова В. А., Катцов В. М., Малевский-Малевиц С. П., Надежина Е. Д., Спорышев П. В., Демченко П. Ф., Елисеев А. В., Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч., 2004.** Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей, в кн.: Труды Всемирной конференции по изменению климата, Москва, 29 сентября — 3 октября 2003, М., Новости, с. 216–225.
- Молькентин Е. К., Надежина Е. Д., Шкляревич О. Б., 2001.** Пространственная изменчивость модельных характеристик многолетнемерзлых грунтов, Метеорология и гидрология, № 8, с. 89–97.
- Павлов А. В., 1997.** Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз, Криосфера Земли, т. 1, № 1, с. 47–58.
- Паников Н. С., Сизова М. В., Зеленев В. В., Махов Г. А., Наумов А. В., Гаджиев И. М., 1996.** Эмиссия CH_4 и CO_2 из болот юга Западной Сибири: пространственное и временное варьирование потоков, Экологическая химия, № 4, с. 13–24.
- Паников Н. С., Глаголев М. В., Кравченко И. К., Мастепанов М. А., Косых Н. П., Миронычева-Токарева Н. П., Наумов А. В., Иноуэ Г., Максюттов Ш., 1997.** Эмиссия метана из верховых болот Западной Сибири в зависимости от характера растительного покрова, Экологическая химия, т. 1, № 6, с. 59–67.
- Панов В. Д., 1993.** Эволюция современного оледенения Кавказа, СПб, Гидрометеоиздат, 431 с.
- Яговкина С. В., Кароль И. Л., Зубов В. А., Лагун В. Е., Решетников А. И., Розанов Е. В., 2003.** Оценка потоков метана в атмосферу с территории газовых месторождений севера Западной Сибири с использованием трехмерной региональной модели переноса, Метеорология и гидрология, № 4, с. 49–63.
- Anisimov O. A., 1989.** Changing climate and permafrost distribution in the Soviet Arctic, *Physical Geography*, vol. 10, No. 3, pp. 285–293.
- Anisimov O. A., 2007.** Potential feedback of thawing permafrost to the global climate system through methane emission, *Environmental Res. Lett.*, No. 2.
- Anisimov O. A. and Nelson F. E., 1997.** Permafrost zonation and climate change in the Northern Hemisphere: Results from transient general circulation models, *Climatic Change*, vol. 35, No. 2, pp. 241–258.
- Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., and Nelson F. E., 1997.** Global warming and active-layer thickness: Results from transient general circulation models, *Global and Planetary Change*, vol. 15, No. 3–4, pp. 61–77.
- Anisimov O. A., Shiklomanov N. I., and Nelson F. E., 2002.** Variability of seasonal thaw depth in permafrost regions: A stochastic modeling approach, *Ecological Modelling*, No. 3, pp. 217–227.
- Climate Change 1994, 1995.** Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Intergovernmental Panel of Climate Change, Cambridge University Press, 339 p.
- Climate Change 1995, 1996.** The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Houghton J. T., Meira Filho L. G., Callander B. A., et al. (eds.), Cambridge University Press, 572 p.
- Climate Change 2001, 2001.** The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., et al. (eds.), Cambridge University Press, 881 p.
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D., and Shklyarevich O. B., 2001.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution in Russia, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 32, No. 1, pp. 1–11.
- Sazonova T. S. and Romanovsky V. E., 2003.** A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures, *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 14, No. 2, pp. 125–140.
- Stendel M. and Christensen J. H., 2002.** Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 29, No. 13, pp. 10-1–10-4.
- Whalen S. C. and Reeburgh W. S., 1992.** Interannual variations in tundra methane emission: A 4-year time series at fixed sites, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 6, No. 2, pp. 139–159.
- Whalen S. C., Reeburgh S. W., and Kizer K. S., 1991.** Methane consumption and emission by taiga, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 5, No. 3, pp. 261–273.