

## ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ГРУНТОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А. Д. Дучков, Л. С. Соколова, А. В. Павлов\*

*Институт геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3, Россия*

*\* Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия*

Анализ многолетних метеорологических и режимных геокриологических данных убедительно свидетельствует о современном повышении температуры воздуха ( $T_a$ ) и грунтов ( $T_g$ ) в Западной Сибири. Тренд возрастания  $T_a$  за последние 25—30 лет изменяется от 0,03 до 0,08 °С/год (в среднем равен 0,05 °С/год) и не зависит от географической широты местности. Повышение температуры приповерхностных горизонтов грунтов за последние 15—25 лет в ряде пунктов составляет 1 °С и более. Самое значительное современное повышение температуры грунтов на Севере приходится на участки сплошной криолитозоны. С конца 1960-х гг. в районах сезонной криолитозоны отмечается уменьшение мощности сезонноталого слоя вследствие потепления климата. К середине XXI в. прогнозируется повышение температуры воздуха и грунтов до 2—2,5 °С. Во второй половине XXI в. потепление климата приведет к повсеместной деградации криолитозоны, что будет отчетливо проявляться даже в арктических районах. Экологические последствия климатического потепления окажутся наиболее опасными для районов криолитозоны, занимающей в Западной Сибири около 0,7 млн км<sup>2</sup>.

*Глобальные изменения, климат, мониторинг, температура воздуха и пород, прогноз*

### ESTIMATION OF MODERN CHANGES IN AIR AND SOIL TEMPERATURE IN WEST SIBERIA

A. D. Duchkov, L. S. Sokolova, A. V. Pavlov\*

*Institute of Geophysics, SB RAS, 630090, Novosibirsk, prosp. Akad. Koptyuga 3, Russia*

*\* Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia*

The analysis of long-term meteorological and geocryological regime data convincingly testifies to modern increase in temperature of air ( $T_a$ ) and soils ( $T_g$ ) in West Siberia. The trend of increase in  $T_a$  for the last 25—30 years changes from 0.03 up to 0.08 °C per year (on the average it is 0.05 °C per year) and does not depend on the latitude of the district. The increase in the temperature of upper soils horizons for the last 15—25 years in a number of stations is 1 °C and more. The most significant recent increase in soil temperature in the North is observed on sites of continuous permafrost. In the regions of seasonal permafrost thinning of active layer owing to warming of the climate occurs since the end of 1960's. By the middle of XXI century an increase in air and soil temperature up to 2—2,5 °C is predicted. In the second half of XXI century warming of the climate will result in universal degradation of permafrost, which will be distinctly displayed even in arctic regions. The ecological consequences of the climate warming will appear to be the most dangerous for the permafrost regions, occupying about 0.7 mln of km<sup>2</sup> in West Siberia.

*Global change, climate, monitoring, temperature of air and rocks, forecast*

### ВВЕДЕНИЕ

Возникновение и эволюция криолитозоны тесно связаны с изменениями климата. Современное температурное поле мерзлых пород определяется климатическими условиями на земной поверхности и внутриземным тепловым потоком. Изучение температурного поля мерзлых пород, наряду с другими параметрами, дает возможность исследовать их реакцию на глобальные изменения климата. Эта проблема весьма актуальна для Западной Сибири, где криолитозона развита на территории около 0,7 млн км<sup>2</sup>, и в ее пределах возникли большие города, предприятия по добыче нефти и газа [Геокриология..., 1989; Балобаев, 1991; Геокриологическая..., 1996].

Вся экономическая инфраструктура в северных районах Западной Сибири развивается с учетом наличия криолитозоны, поэтому изучение возможных изменений температурного поля многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления климата и воздействия техногенных факторов представляет особое социально-экономическое значение.

Предполагается, что современная криолитозона сформировалась на севере Евразии в позднем плейстоцене в результате похолоданий, последнее из которых (сарганское) случилось 27—15 тыс. лет назад [Балобаев, 1991; Kondratieva et al., 1993]. В то время температура приземного

слоя воздуха была ниже современной на 8—10 °С, а многолетнемерзлые породы в Западной Сибири занимали значительно большую территорию, распространяясь к югу до 48—49° с.ш. Вследствие потепления климата в голоцене территория криолитозоны существенно уменьшилась: в пределах Западной Сибири южная граница мерзлых пород сместилась к северу примерно до 60° с.ш. (широтный отрезок р. Обь), т. е. на 1000—1500 км. Непрерывная (с поверхности) криолитозона в настоящее время здесь фиксируется в основном севернее 65—67° с.ш., где ее мощность достигает 400—600 м. Южнее сохранились лишь блоки погребенной (реликтовой), прерывистой и редкоостровной (на участках торфяников) криолитозоны.

### ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ КРИОЛИТОЗОНЫ

Современное температурное поле криолитозоны Западной Сибири весьма своеобразно. На рис. 1 показано изменение температуры воздуха ( $T_B$ ) и грунтов ( $T_r$ ) (а), а также современных геотермических параметров (б, в) вдоль условного субмеридионального профиля (полоса от 66 до 74° в.д.), пересекающего Западную Сибирь [Devyatkin, An, 1994]. Температура грунтов характеризуется значительными вариациями на одной и той же широте местности, поэтому на графике (см. рис. 1, а) даны огибающие (максимум и минимум) экспериментальных значений  $T_r$  (сплошные линии), а также их средние значения (пунктирная линия). Очевидно, что температура грунтов  $T_r$  повсеместно выше  $T_B$ , что вызвано в основном отепляющим влиянием снежного покрова. Разница между этими температурами варьирует в Западной Сибири от 3 до 7 °С, увеличиваясь к югу, где отепляющее влияние снежного покрова возрастает. Мощность мерзлой толщи, ее сплошность зависят от изменений поверхностной температуры грунтов (см. рис. 1, б). На профиле схематически отражено формирование мощных сквозных таликов, связанных с крупными водными артериями (см. рис. 1, б). Рисунок 1, в характеризует изменение вдоль профиля тепловых потоков в подстилающих талых породах ( $Q = 50—60$  мВт/м<sup>2</sup>), непосредственно в мерзлой толще ( $Q_M = 20—40$  мВт/м<sup>2</sup>) и в сезонноталом слое ( $Q_0 \approx -20$  мВт/м<sup>2</sup>). Во всех случаях тепловой поток рассчитан по измеренным значениям геотермического градиента и коэффициента теплопроводности мерзлых и талых пород. Различия в значениях  $Q$ ,  $Q_M$  и  $Q_0$  еще раз подтверждает известное положение о нестабильности термического состояния мерзлых пород почти на всей территории криолитозоны Западной Сибири.

Несмотря на многообразие реальных ситуаций можно выделить три основные группы тем-

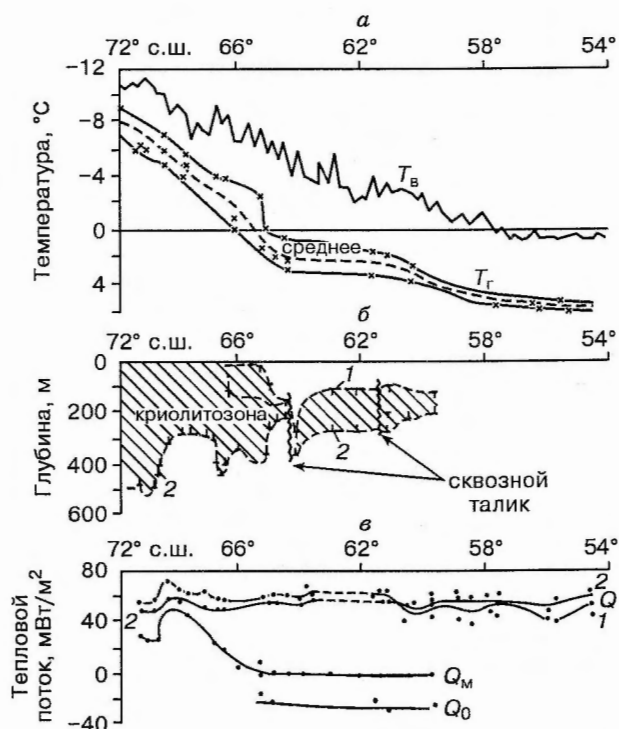


Рис. 1. Изменение температуры воздуха и мерзлотно-геотермических параметров в субмеридиональном направлении для Западной Сибири [Devyatkin, An, 1994].

а — среднегодовые значения температуры воздуха ( $T_B$ ) и многолетнемерзлых грунтов ( $T_r$ ); б — расположение верхней (1) и нижней (2) границ мерзлой толщи; в — значения теплового потока:  $Q_0$  — в сезонноталом слое,  $Q_M$  — в мерзлой толще,  $Q$  — в подстилающих талых породах (1 — измеренные, 2 — рассчитанные с учетом климатической поправки). Точки отображают экспериментальные данные.

пературных разрезов для северных районов (три температурные зоны) [Температура..., 1994]. Крайний Север (севернее полярного круга) характеризуется существенным охлаждением криолитозоны (фоновые температуры пород  $T_0$  изменяются от -3 до -14 °С) и высокими значениями геотермических градиентов в мерзлой толще (рис. 2, а). Южнее фиксируется слабоохлажденная криолитозона ( $T_0 = -0,2—-0,5$  °С) — непрерывная с поверхности (рис. 2, б) и погребенно-реликтовая (рис. 2, в). Здесь практически отсутствует геотермический градиент в мерзлой толще.

### РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Соотношение между тепловыми потоками в мерзлых ( $Q_M$ ) и подстилающих талых породах ( $Q$ ) позволяет оценить степень стационарности

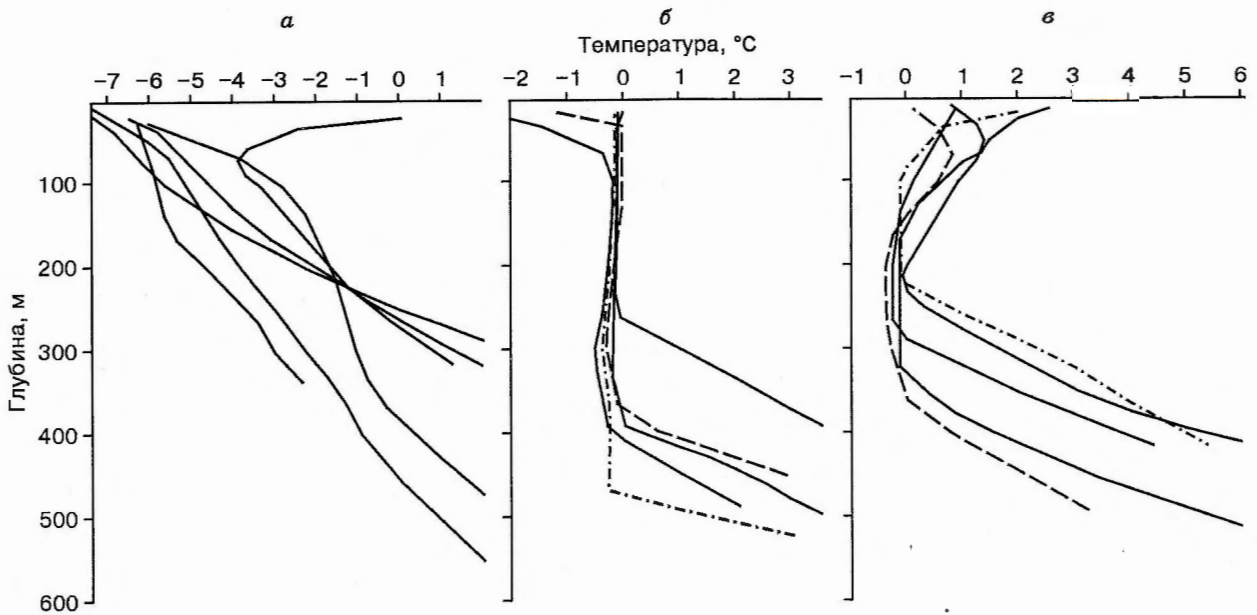


Рис. 2. Типичные геотермические разрезы для северных (а), центральных (б) и южных (в) районов Западной Сибири [Температура..., 1994].

температурного поля криолитозоны и направленность ее современной эволюции [Балобаев, 1991; Дучков и др., 1995]. Известно, что вблизи фазовой границы значения тепловых потоков связаны между собой условием Стефана:

$$Q_m = Q + qwV \text{ или } (Q_m/Q) - 1 = qwV/Q, \quad (1)$$

где  $q$  — теплота плавления льда в породах,  $w$  — льдистость пород,  $V$  — скорость промерзания (протаивания).

Основываясь на (1), можно прогнозировать три возможных варианта взаимосвязи между  $Q_m$  и  $Q$ . Во-первых, эти потоки могут быть равны и отношение  $Q_m/Q = 1$ . Это свидетельствует о стабильности нижней фазовой границы ( $V = 0$ ), температурного поля вблизи нее и собственно криолитозоны. Во-вторых, тепловой поток в мерзлых породах может быть меньше, чем в талых ( $Q_m/Q < 1$ ). Эта ситуация свидетельствует о смещении фазовой границы вверх ( $V < 0$ ) и нестационарности криолитозоны вследствие длительного ее прогревания снизу. Чем меньше отношение  $Q_m/Q$ , тем существеннее нарушение температурного поля мерзлой толщи. Возможен третий случай, когда тепловой поток в мерзлых породах больше глубинного и  $Q_m/Q > 1$ . В этом случае температурное поле также нестационарно вследствие промерзания пород сверху ( $V > 0$ ) и увеличения толщи криолитозоны. Таким образом, отношение  $Q_m/Q$  можно использовать в качестве критерия для оценки степени стац-

нарности мерзлых толщ и направленности их эволюции [Балобаев, 1991; Балобаев, Дучков, 1998]. Использование данной методики предполагает, что известно расположение нижней фазовой границы и тепловых потоков вблизи нее. Естественно, что методика применима только в пределах мезокайнозойских впадин, песчано-глинистые породы которых содержат пресную воду.

Соотношение между тепловыми потоками в мерзлых и талых породах использовано для районирования криолитозоны Западной Сибири по степени ее нестационарности [Дучков и др., 1995] (результат представлен на рис. 3). В современных условиях в Западной Сибири отмечается нестационарный (деградирующий) тип мерзлых толщ (почти повсеместно  $Q_m/Q < 1$ ). Их деградация, вероятно, происходила в течение всего голоцена [Kondratieva et al., 1993]. Территория низкотемпературной криолитозоны (Крайний Север) характеризуется следующим условием нестационарности:  $0,2 < Q_m/Q < 1$  (см. рис. 3). Здесь преобладают сплошные мерзлые породы, реакция их температуры на ожидаемое потепление климата может быть относительно высокой, хотя и различной. Слабоохлажденная криолитозона (южнее полярного круга) характеризуется минимальными значениями геотермического градиента; отношение  $Q_m/Q$  не превышает 0,2. Потепление климата не повлияет существенно на скорость деградации погребенной

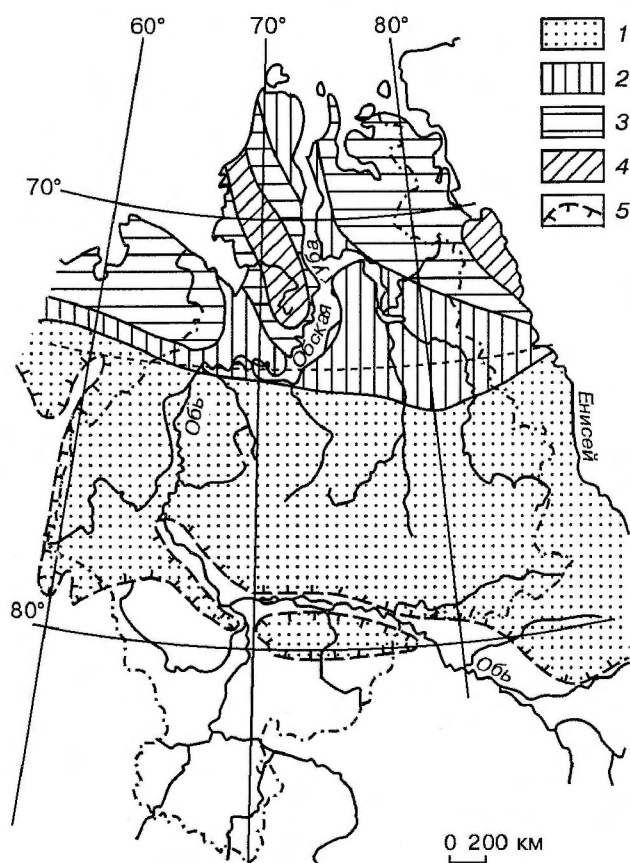


Рис. 3. Схема районирования термического поля криолитозоны Западной Сибири по степени его нестационарности [Дучков и др., 1995].

1—4 — отношения  $Q_m/Q$ : 1 — 0—0,2; 2 — 0,2—0,5; 3 — 0,5—0,8; 4 — 0,8—1; 5 — южная граница распространения криолитозоны.

мерзлоты из-за демпфирующего влияния перекрывающего слоя талых пород.

Прогноз эволюции мерзлых толщ в результате ожидаемого в XXI в. потепления климата возможен методами численного моделирования температурного поля мерзлых пород и путем анализа трендов современных мерзлотно-климатических изменений и их продления на ближайшие годы. Точность прогноза в большой степени определяется достоверностью принятых сценариев изменения климата.

### ТЕНДЕНЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ГРУНТОВ

Климатологи неоднократно отмечали, что ближайшая перспектива эволюции криолитозоны (20—50 лет) может быть оценена из анализа

результатов наблюдений за температурой воздуха и почв на метео- и геокриологических станциях. Такой анализ для обширных территорий выполнялся, например, в работах [Груза и др., 1989; Будыко и др., 1993; Ефимова и др., 1996; Анисимов, Поляков, 1999; Pavlov, 1996], а для районов распространения сезонно- и многолетне-мерзлых пород в работах [Skorbinin, 1994; Skorbinin, 1997; Павлов, 1975, 1997]. Рассмотрим многолетние вариации температуры воздуха ( $T_v$ ) и грунтов ( $T_r$ ) по наблюдениям на 30 метеостанциях Западной Сибири за последние 30—35 лет. Целью исследования является уточнение регионального сценария изменения климата в этом регионе. Выбор временного периода (1960—1965 или 1965—1996 гг.) обусловлен тем, что в это время климатический процесс повсеместно в Сибири (в Арктике и в центральных районах) развивался одинаково в сторону потепления [Павлов, 1997].

Средние значения скоростей изменения среднегодовых значений  $T_v$  в разных пунктах Западно-Сибирской равнины показаны на рис. 4. Оценки темпа изменения температур воздуха и грунтов получены по единой методике. Во всех случаях рассчитывали линейную корреляцию среднегодовых значений температуры со временем в указанный период. В итоге было установлено, что в последней трети XX в. температура воздуха в Западной Сибири повсеместно возросла. Потепление климата в основном обусловлено повышением зимних температур воздуха: для территории Западной Сибири в целом повышение  $T_v$  за холодные периоды 1965—1995 гг. составило 1,4 °C, тогда как за теплые периоды — 0,9 °C. Скорости увеличения среднегодовых значений  $T_v$  в разных пунктах (от Арктического побережья до широт Новосибирска и Барнаула) изменяются от 0,03 до 0,08 °C/год, составляя в среднем  $(0,05 \pm 0,027)$  °C/год. Пространственные вариации темпа изменения  $T_v$  не имеют закономерного характера в направлении с севера на юг (вплоть до 50° с.ш.). Этот темп в среднем остается примерно одинаковым, имея даже некоторую тенденцию возрастания к югу. Так, за последние 30 лет среднее повышение температуры воздуха для районов выше Полярного круга составило 1,1, а южнее — 1,2 °C. Наблюдающиеся вариации температуры воздуха, несомненно, отражают реальный характер изменения климата в конце XX в.

Мониторинг температуры почв на глубинах 3,2—3,6 м в районах глубокого сезонного и многолетнего промерзания осуществлялся в пунктах Березово (темп увеличения температуры составляет 0,05 °C/год), Тобольск (0,02 °C/год), Омск (0,05 °C/год), Новосибирск (0,04 °C/год) и

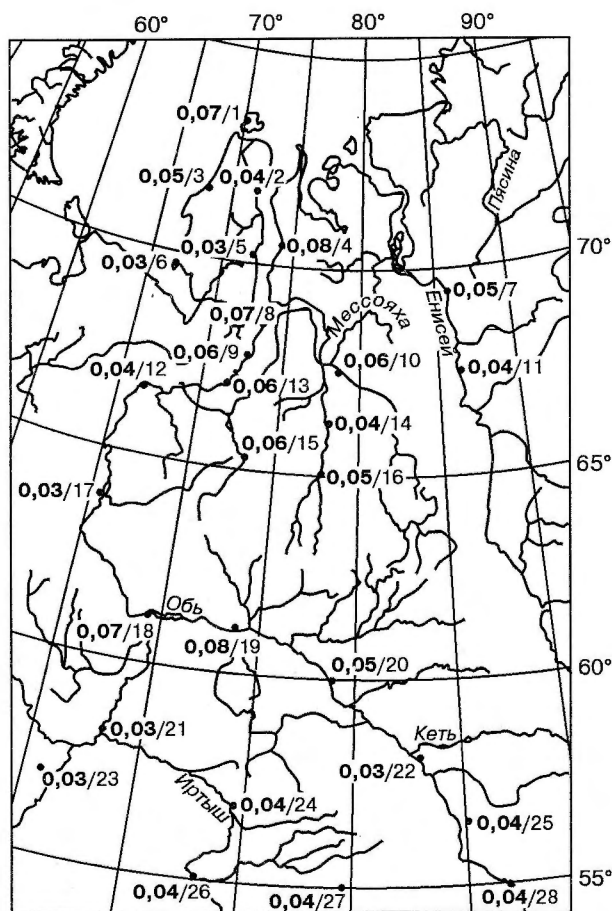


Рис. 4. Пространственные вариации темпа изменения температуры воздуха в Западной Сибири в последней трети XX в. по наблюдениям на метеостанциях (точки).

Цифры на схеме: в числителе — средние значения тренда за период наблюдения, °С/год; в знаменателе — номера пунктов наблюдений (1 — о. Белый, 2 — Тамбей, 3 — Харасовой, 4 — Тадибе-Яха, 5 — Се-Яха, 6 — Марре-Сале, 7 — Дудинка, 8 — Мыс Каменный, 9 — Новый Порт, 10 — Тазовский, 11 — Игарка, 12 — Салехард, 13 — Яр-Сале, 14 — Уренгой, 15 — Надым, 16 — Тарко-Сале, 17 — Березово, 18 — Ханты-Мансийск, 19 — Сургут, 20 — Александровское, 21 — Тобольск, 22 — Колпашево, 23 — Тюмень, 24 — Тара, 25 — Томск, 26 — Омск, 27 — Барабинск, 28 — Новосибирск). Учтены также наблюдения в Барнауле. Периоды наблюдений: 1965—1993 гг. — пп. 1—11, 13—15; 1960—1993 гг. — пп. 12, 17, 21, 23, 25; 1960—1990 гг. — пп. 16, 18—20, 22, 24; 1960—1996 гг. — пп. 26, 28 и Барнаул.

Барнаул (0,06 °С/год). Современное повышение температуры грунтов фиксируется более четко, хотя его темп мало отличается от вариаций  $T_B$ . Скорости увеличения  $T_r$  в указанных пунктах изменялись от 0,02 до 0,06 °С/год, составляя в среднем (0,047 ± 0,01) °С/год. Повсеместно значения  $T_r$  сохранялись выше  $T_B$  на 3,5—6,5 °С, причем со временем эта разница может в течение

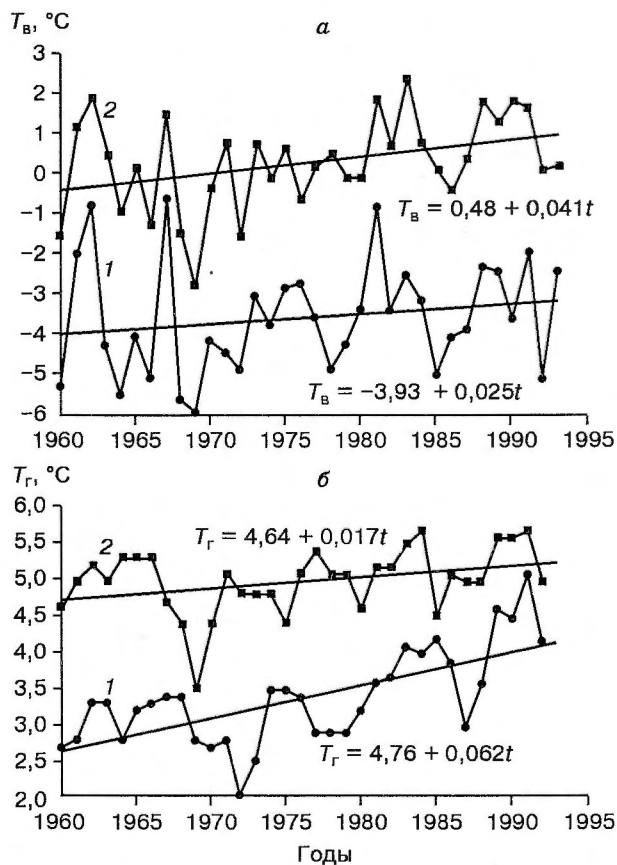


Рис. 5. Изменения во времени ( $t$ ) среднегодовых значений температуры воздуха  $T_B$  (а) и грунтов  $T_r$  (б) и их тренды по наблюдениям в Березово и Тобольске.

1 — данные наблюдений метеостанции Березово, 2 — метеостанции Тобольск.

длительного периода оставаться в среднем постоянной (метеостанции Барнаул, Омск), либо изменяться (рис. 5). В районах Крайнего Севера более точные наблюдения температуры грунтов проводились только на геокриологических станциях. Современное потепление многолетнемерзлых грунтов до глубины 10 м с темпом около 0,03 °С/год отчетливо отмечается на геокриологической станции Марре-Сале за 1980—1996 гг. [Павлов, 1997]. В этот же период фиксируется заметное уменьшение здесь мощности слоя сезонного промерзания [Скорбилин, 1997].

Таким образом, в последние десятилетия XX в. повсеместно в Западной Сибири происходило примерно одинаковое по широте (со скоростью 0,03—0,08 °С/год) повышение температуры приземного слоя воздуха. При сохранении указанного темпа потепления климата темпера-

тура воздуха в северных районах Сибири может возрасти на 1,5—3 °С к 2050 г.

Интересно отметить, что подобный темп возрастания температуры предсказывался сценариями климата, предложенными разными авторами в 1970—1980-е гг. [Manabe, Wetherald, 1975; Будыко, 1980; Hansen et al., 1983; Mitchell et al., 1990]. Согласно анализу В. Т. Балобаева [Температура..., 1994; Балобаев, 1997] наиболее приемлемыми для Сибири представляются сценарии, основанные на трехмерных радиационно-циркуляционных моделях климата, учитывающих удвоение концентрации двуокиси углерода в атмосфере к концу XXI в. Эти сценарии прогнозируют увеличение температуры земной поверхности на 3—7 °С за 100 лет.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

Рассмотренная информация о температурных параметрах современной криолитозоны и сценариях ожидаемых изменений климата представляет набор начальных и граничных условий, достаточный для выполнения численного моделирования эволюции температурного поля криолитозоны в условиях возможного потепления климата в XXI в. Результаты моделирования для севера Западной Сибири приводятся в ряде публикаций [Балобаев, Дучков, 1998; Балобаев, Павлов, 1998; Дучков и др., 1997; Вялов и др., 1997]. Оценки ожидаемых приращений температуры воздуха ( $T_v$ ), необходимые для задания верхнего граничного условия, получены В. Т. Балобаевым по одной из радиационно-циркуляционных моделей при условии возможного удвоения  $CO_2$  в атмосфере в конце XXI в. [Manabe, Wetherald, 1980]. Прогнозное повышение  $T_v$  на севере Западной Сибири составляет 0,8—1,4 °С на 2020 г., 2,1—3,2 — на 2050 г. и 4,3—6,6 °С на 2100 г. В результате моделирования В. Т. Балобаевым были получены температурные разрезы (термограммы) на глубину до 1 км для разных периодов следующего столетия. Используем часть этих материалов для иллюстрации возможных изменений температурного поля мерзлых толщ в случае сохранения наблюдаемого темпа возрастания температуры воздуха.

Расчетные термограммы для ряда участков Западной Сибири показывают, что потепление климата приведет к значительному прогреванию и протаиванию мерзлых пород (рис. 6). В разных геокриологических зонах эти процессы протекают неодинаково. Очевидно, что там, где температура поверхности до конца XXI в. сохранится отрицательной, криолитозона не исчезнет (см. рис. 6,а). Повышение температуры многолетне-

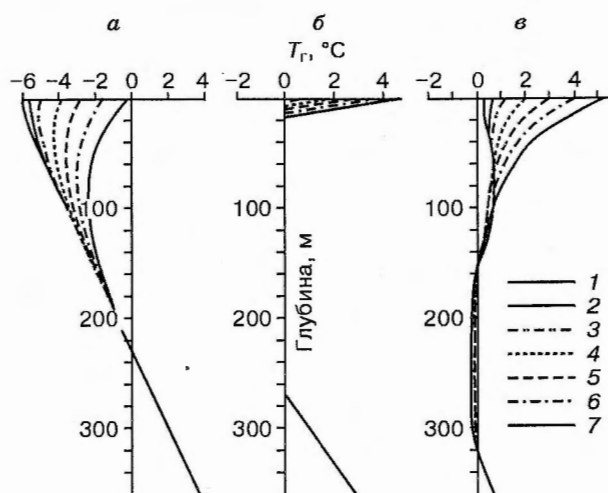


Рис. 6. Прогноз возможных изменений температуры грунтов в различных районах криолитозоны Западной Сибири под влиянием потепления климата на 2000—2100 гг.

а — Арктическая площадь, Ямал; б — Костровская площадь; в — толщи Уренгой-3. 1—7 — годы: 1 — 2000, 2 — 2010, 3 — 2020, 4 — 2040, 5 — 2060, 6 — 2080 и 7 — 2100.

мерзлой толщи в отдельных случаях здесь достигнет глубины 250—260 м. Однако в районах сплошной криолитозоны, примыкающих к ее южной границе, прогнозируется протаивание многолетнемерзлых пород сверху (в основном за счет заметного снижения глубины сезонного промерзания). Нестационарная слабоохлажденная криолитозона, находящаяся при температуре замерзания поровой и трещинной влаги, деградирует уже в настоящее время (см. рис. 6,б). К концу XXI в. протаивание пород сверху здесь может составить 15—18 м, а снизу — 2,5—2,7 м. Температура мерзлой толщи при этом не будет изменяться, так как она соответствует температуре таяния льда (примерно  $-0,1$  °С). В зоне погребенных мерзлых пород (см. рис. 6,в) потепление климата может привести лишь к повышению температуры верхнего талого слоя и незначительному уменьшению мощности мерзлых пород сверху и снизу (за 100 лет — на 1,5—2 м). Контрастность ожидаемого повышения температуры мерзлых пород при потеплении климата заметно возрастает с понижением их современной температуры [Вялов и др., 1997; Павлов, 1997].

Таким образом, численное моделирование прогнозирует значительное изменение современного состояния криолитозоны в случае потепления климата. Если имеющиеся сценарии потепления климата осуществляются, то в приповерхностном слое пород возникнут аномалии

температуры, которые можно (и нужно) фиксировать методами температурного мониторинга.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современного температурного поля мерзлых пород показывает, что криолитозона Западной Сибири в настоящее время почти повсеместно прогревается и деградирует. Этот процесс может усилиться, если в XXI в. продолжится глобальное потепление климата. Эмпирические данные метеостанций Западной Сибири свидетельствуют, что в последние 30—35 лет температура воздуха и грунтов здесь возросла со скоростью 0,03—0,08 °С/год. Примерно такой темп предсказывался наиболее радикальными сценариями потепления климата в 1970—1980-х гг. При его сохранении температура воздуха в северных районах может возрасти на 1,5—2 °С к 2050 г., а южная граница сплошных мерзлых пород сместится к северу на 150—200 км. Специальные расчеты показали, что повышение температуры воздуха приведет к формированию значительных температурных аномалий в верхнем слое пород и к частичной деградации мерзлых толщ.

Выполненные оценки изменений температурного режима криолитозоны Западной Сибири хотя и нуждаются в дальнейшем уточнении и детализации, ясно указывают на серьезность проблемы возможного быстрого оттаивания мерзлых пород с поверхности. Для оперативного наблюдения за реакцией криолитозоны на потепление климата и для разработки практических рекомендаций необходимо усиление геокриологических и геотермических исследований в северных районах Сибири. В первую очередь необходимо развитие сети станций, осуществляющих мониторинг криолитозоны.

Работа выполнена при поддержке Российской государственной программы „Глобальные изменения природной среды и климата“ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 98-05-64633). Авторы благодарят Е. А. Ваганова, А. А. Васильева, В. А. Дубровина, В. В. Селегея, Н. А. Скорбилина и Л. П. Харитонову за предоставление первичных материалов. Нельзя не выразить признательность С. М. Фотиеву за внимательное прочтение рукописи статьи и сделанные замечания, которые позволили существенно ее улучшить при подготовке к публикации в журнале.

### Литература

Анисимов О. А., Поляков В. Ю. К прогнозу изменения температуры воздуха для первой четверти XXI столетия // Метеорология и гидрология, 1999, № 1, с. 25—30.

Балобаев В. Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

Балобаев В. Т. Глобальные изменения климата и мерзлота // Наука и образование, 1997, № 2, с. 82—90.

Балобаев В. Т., Дучков А. Д. Прогноз изменения теплового и фазового состояния криолитозоны Западной Сибири // Глобальные изменения природной среды / Глав. ред. Н. Л. Добрецов, В. И. Коваленко. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1998, с. 19—29.

Балобаев В. Т., Павлов А. В. Эволюция криолитозоны Западной Сибири при современных и ожидаемых в будущем изменениях климата // ДАН, 1998, т. 363, № 1, с. 7—9.

Будыко М. И. Климат в прошлом и будущем. Л., Гидрометеоздат, 1980, 351 с.

Будыко М. И., Ефимова Н. А., Лугина К. М. Современное потепление // Метеорология и гидрология, 1993, № 7, с. 29—34.

Вялов С. С., Фотиев С. М., Герасимов А. С., Золотарь А. И. Изменение границ геотермических зон в Западной Сибири при глобальном потеплении климата // Гидротехническое строительство, 1997, № 11, с. 9—13.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Ред. Э. Д. Ершов. М., Недра, 1989, 454 с.

Геокриологическая карта СССР / Ред. Э. Д. Ершов. М., МГУ, 1996.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я., Рочева Э. В. Анализ глобальных данных об изменениях приземной температуры воздуха за период инструментальных наблюдений // Метеорология и гидрология, 1989, № 1, с. 22—31.

Дучков А. Д., Балобаев В. Т., Девяткин В. Н. и др. Геотермическая модель криолитозоны Западной Сибири // Геология и геофизика, 1995, т. 36, № 8, с. 70—79.

Дучков А. Д., Соколова Л. С., Балобаев В. Т. и др. Тепловой поток и геотемпературное поле Сибири // Геология и геофизика, 1997, т. 38, № 11, с. 1716—1729.

Ефимова Н. А., Строкина Л. А., Байкова И. М., Малкова И. В. Изменение основных элементов климата на территории СССР в 1967—1990 гг. // Метеорология и гидрология, 1996, № 4, с. 34—41.

Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, кн. изд-во, 1975, 302 с.

Павлов А. В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 1, с. 47—58.

Скорбилин Н. А. О тенденции в эволюции сезонной криолитозоны Западной Сибири на ближайшие десятилетия // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 1, с. 66—68.

Температура, криолитозона и радиогенная теплогенерация в земной коре Северной Азии // А. Д. Дучков, В. Т. Балобаев, Б. В. Володько и др. Новосибирск, ОИГТМ СО РАН, 1994, 141 с.

Devyatkin V. N., An V. V. Experimental confirmation of temperature increasing of lithosphere's upper layer in West Siberia // Borehole temperatures and climate change. Report of International Workshop. Praha, Geophys. Inst., 1994, p. 87—93.

Hansen J. E., Russel G., Ring D. et al. Efficient three-dimensional global models for climatic studies: models I and II // Monthly Weather Rev., 1983, 111, p. 609—622.

Kondratieva K. A., Khurutzky S. F., Romanovsky N. N. Changes in the extent of permafrost during the late Quaternary period in the territory of the former Soviet Union // Permafrost and periglacial processes, 1993, 4, p. 113—119.

Manabe S., Wetherald R. T. The effect of doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model // J. Atmosf. Sci., 1975, 32, p. 3—15.

Manabe S., Wetherald R. On the distribution of Climate Change from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere // J. Atmosf. Sci., 1980, 37, p. 99—118.

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Mitchell J. F. B., Manabe S., Meleshko V., Tokioka T. Equilibrium climate changes and its implications for the future, Climate change // The IPCC Sci. Assess. Report of working group I of the Intergovernmental panel on climate change, Cambridge Univ. Press, 1990, p. 131—172.

Skorbilin N. A. Dynamics of air temperature regime by meteorological data in West Siberia // Borehole temperatures and

climate change. Report of International Workshop. Praha, Geophys. Inst., 1994, p. 95—99.

Pavlov A. V. Permafrost-Climatic monitoring of Russia: analysis of field data and forecast // Polar Geography, 1996, vol. 20, № 1, p. 44—64.

*Поступила в редакцию  
25 апреля 1999 г.*