

УДК 551.583

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА КАМЧАТКЕ ПО СКВАЖИННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

*Е. И. Гордеев*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский  
E-mail: gordeev@kscnet.ru*

Для воссоздания хронологии климата были проведены измерения температуры на различных глубинах в нескольких скважинах на Камчатке. Полученные термограммы инвертированы в модель изменения климата за последние несколько сотен лет; особое внимание уделялось текущему процессу потепления. Представлены результаты геотермальных измерений, полученных в рамках совместного российско-японско-чешского проекта «Реконструкция климатических изменений по данным температуры в скважинах и годичных колец на полуострове Камчатка» (2000–2002 гг.). Всего сделаны 33 термограммы для 12 скважин (от одной до шести на каждую скважину) до глубин 400 м, расположенных в широтном простирании (между 52 и 54° с. ш.) Центральной Камчатки. Температурные градиенты варьируют в широком диапазоне от 10 до 60 мК/м, и в некоторых скважинах наблюдались значительные колебания подпочвенной температуры, вызванные конвективной теплоотдачей грунтовой воды. Данные были дополнены более старыми данными измерений температуры в скважинах, полученными в начале 1980-х гг. (Смирнов и др., 1991) для измерений теплового потока. Эти сведения менее качественные (с точностью около 0,1 К), но они дают ценную информацию об условиях подпочвенной температуры, которые существовали 20–25 лет назад.

**Ключевые слова:** температура в скважине, термограмма, климатическое изменение, современное потепление.

### ВВЕДЕНИЕ

Для реконструкции климатической эволюции на планетарном уровне часто используются главные временные и пространственные изменения климата. В дополнение к различным палеоклиматическим реконструкциям, основанным на метеорологических и косвенных данных, геотермальный метод инвертирования измерений температура – глубина  $T(z)$  в хронологию изменения температуры у поверхности земли может быть эффективным, особенно в регионах с неполной климатической информацией или там, где ее нет вообще. Из-за медленного проникновения температурного сигнала с поверхности в глубь земли при помощи современных измерений  $T(z)$  можно получить параметры меняющихся условий на поверхности Земли, произошедших много лет назад. Одним из важнейших требований для получения надежной термограммы является тепловая стабилизация скважины, необходимая для получения неискаженного поля температуры.

На Камчатке есть несколько глубоких скважин, которые были пробурены в конце 1970-х – начале 1980-х гг. и все еще пригодны для повторного использования. На этих скважинах, изначально про-

буренных для гидрогеологических целей, была измерена теплопроводность, и данные по тепловому потоку опубликованы в работах Я. Б. Смирнова с соавторами (1991) и В. М. Сугрובה, Ф. А. Яновского (Sugrobov, Yanovsky, 1993). Авторы получили 20 термограмм на скважинах, расположенных в центральной части полуострова, в зоне, ограниченной координатами 51,5–53,5° с. ш. и 156,5–158,5° в. д. Все скважины бурились на глубину 380–640 м, температуру замеряли с интервалом в 20 м, проводимость варьировала в пределах 2,4–2,6 Вт/м·К. Все графики показали одинаковую конфигурацию в верхней части и относительно высокий перепад температур (30–40 мК/м) в нижних частях.

Для более подробных исследований температурных изменений с глубиной в рамках российско-японско-чешского проекта в 2000–2002 гг. были проведены детальные измерения на скважинах в четырех различных районах Камчатки с использованием современной высокоточной аппаратуры.

### ДАННЫЕ

Летом 2000, 2001 и 2002 г. были организованы три экспедиции. Их цель – измерение температуры в выбранных скважинах (табл. 1). Всего были состав-

Таблица 1. Координаты скважин и даты составления термограмм

Table 1. Coordinates of Holes and Dates of Temperature Logs

Скважина	Координаты		Дата составления термограмм					
	долгота	широта	1	2	3	4	5	6
АК-1, Апача	157-07-44 E	52-55-20 N	12.08.02					
АК-2, Апача	157-06-23 E	52-55-26 N	12.08.02					
Е-1, Елизово	158-28-39 E	53-15-50 N	08.10.00	14.11.00	14.03.01	16.09.01	22.11.01	11.08.02
М-2, Малки	157-28-08 E	53-20-19 N	28.09.00	14.09.01	09.08.02			
М-12, Малки	157-28-19 E	53-19-40 N	28.09.00	13.09.01	09.08.02			
М-19, Малки	157-29-17 E	53-19-33 N	27.09.00	14.09.01	10.08.02			
Р-25, Паратунка	158-15-13 E	52-54-41 N	30.09.00	19.09.01	08.08.02			
Р-33, Паратунка	158-11-28 E	52-53-35 N	30.09.00	19.09.01	08.08.02			
Р-2	158-56-10 E	53-05-27 N	15.09.01	11.08.02				
UZ-2, Юго-западная	158-24-50 E	53-10-08 N	11.10.00	15.11.00	15.05.01	15.09.01	27.11.01	13.08.02

лены 33 термограммы для 12 скважин (от одной до шести термограмм на скважину) по направлению от поверхности на глубину 400 м с пошаговым измерением через 2 м. Точность отдельных измерений – 0,01 К.

Исследуемое поле температур очень неоднородно, средние перепады температур в отдельных скважинах варьировали от 0,01 до 0,04 К/м. Повторные измерения показали определенные незначительные временные колебания температуры с амплитудой около 0,1–0,2 К без определенной тенденции и четкой зависимости от времени. В противоположность этому зафиксированные температуры относительно стабильны не только во время трехлетнего периода измерений, но и хорошо соотносятся со старыми результатами, полученными 20–25 лет назад. На рис. 1 представлены данные измерений температуры в скважинах, полученные в 2002 г.

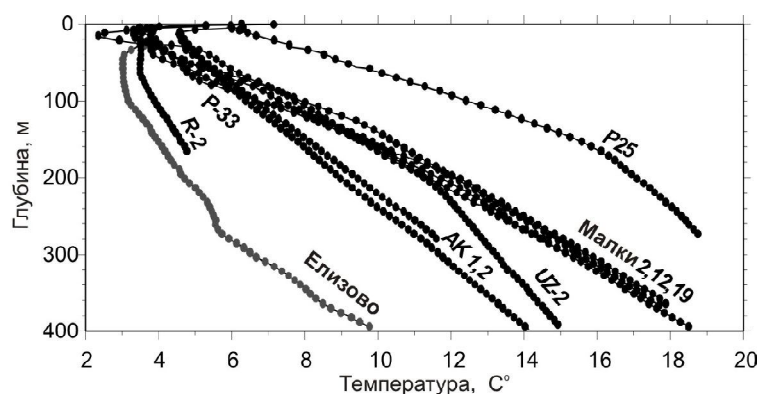


Рис. 1. Зависимости температура – глубина для скважин из табл. 1, полученные по измерениям 2002 г.

Fig. 1. Temperature-depth profiles for holes in Table 1, measured in 2002

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ

Все термограммы были инвертированы для восстановления изменения температуры по времени у поверхности земли при помощи инверсионного кода FSI (Functional Space Inversion) (Bodri, Cermak, 1995), а соответствующие изменения климата восстановлены за последние три столетия. Ниже пред-

ставлены предварительные результаты для скважин Апачи, Малок и Елизово.

### Группа «Апача» (скв. АК-1, -2)

Обе скважины пробурены в слоях раздробленной глинистой породы, покрытой тонким поверхностным слоем гравия (12 м в скв. АК-1 и 46 м в скв. АК-2). Более высокая мощность высокопроницаемого слоя гравия в скв. АК-2 отражается в более сильных вариациях градиента околосредней температуры. Для обеих скважин средняя годовая температура поверхности 4,3°C. Реконструкции изменения температуры по времени у поверхности земли для обеих скважин Апачи, полученные по отдельной и комплексной инверсиям, представлены на рис. 2. Самые достоверные результаты получены при свободной инверсии со стандартными отклонениями (SDs-standard deviations) по теплопроводности 2 Вт/м·К и по температуре 0,1 К (см. рис. 2, слева), которая указывает на потепление на 0,7–1 К за последние 70–100 лет. Для уменьшающихся SDs изменения температуры по времени у поверхности земли все больше и больше выходят из фазы (см. рис. 2, справа, 0,5 Вт/м·К и 0,05 К).

### Группа «Малки» (скв. М-2, -12, -19)

Район Малок характеризуется наличием поверхностного аллювиально-гравийного слоя толщиной 80–90 м с подлежащими туфопесчаниками и брекчиями, которые подстилаются на глубине ниже 300 м лавой дацитового состава (скв. М-2), а также обломочными и глинистыми породами (скв. М-12 и -19). Для всех трех скважин было выполнено по одному каротажу в 2000, 2001 и 2002 г. В начале 1980-х гг. в скв. М-2 и -12 были также проведены измерения температуры (Смирнов и др., 1991). Теплопроводность гравийного слоя получена из коэффициента перепада температур и равна 1,85 Вт/м·К. Теплопроводность нижерасположенных слоев, по данным измерений, доходила до 2,6 Вт/м·К (Смирнов и др., 1991). Старые и новые графики температура – глубина хорошо согласуются, за исключением самой верхней части, где старые температурные данные ниже по-

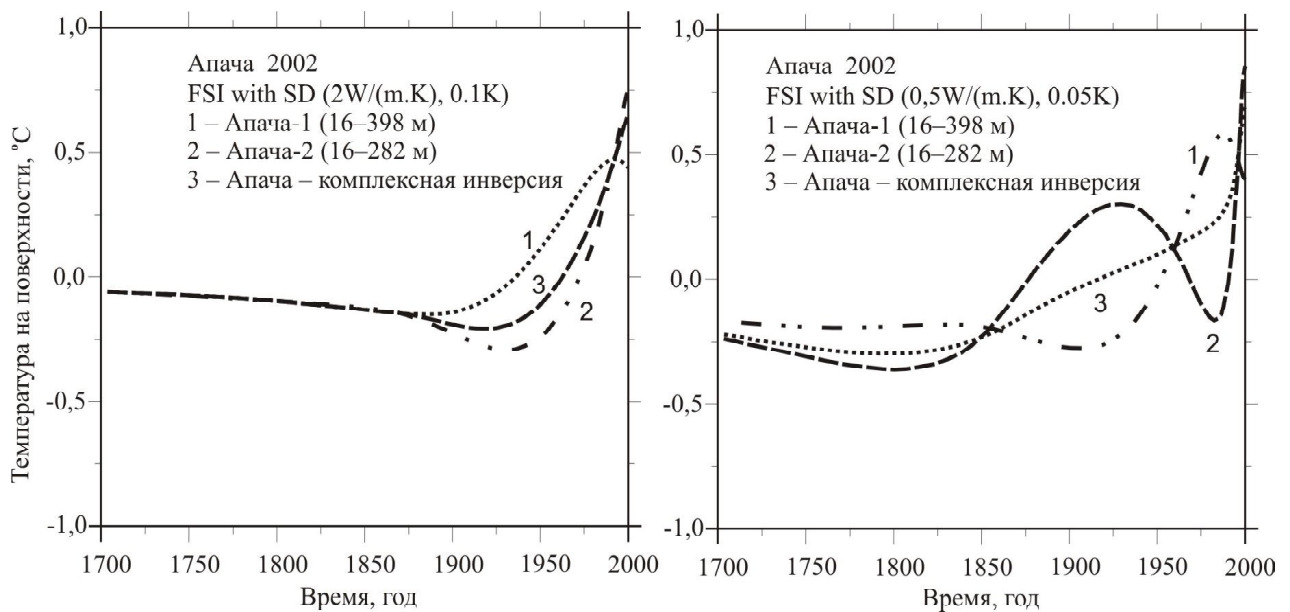


Рис. 2. Инверсия термограмм со скв. АК-1 и -2

Fig. 2. Inversion of the temperature logs from holes AK-1 and -2

чти на 1 К, что дает основание предполагать потепление за последние 20 лет. Поскольку миграция околоповерхностной воды может оказывать влияние на верхний слой, эту разницу в старых и новых измерениях следует рассматривать с осторожностью. Растительный покров в данном районе варьирует от густых кустарников и кустарниковых деревьев до открытой болотистой местности, что оказывают влияние на среднегодовую температуру почвы. Поверхностные температуры экстраполированы из серии пологих  $T(z)$  графиков от 3,4 до 3,7°C в пунктах М-19 и -2 и 2,8–3,2°C в пункте М-12.

Район Малок расположен в широкой долине на возвышении около 250 м н. у. м. и окружен холмистой местностью с превышением высоты в 500–700 м. Даже когда повторные графики температура–глубина подтверждают относительно высокую стабильность, нельзя исключать и определенную медленную миграцию воды в околоповерхностном водопроницаемом гравийном слое. Сравнение  $T(z)$  графика скв. М-19 с искусственными кривыми, представляющими собой проводящий годовой поток, с просачиванием поверхностной воды (Stallman, 1963) показало, что амплитуда температурной волны была больше, чем ожидаемая при чистом проводящем режиме, и что эта амплитуда соответствовала бы комбинированному действию проводимости и просачивания воды с высокой скоростью – 5–7 м/год.

Индивидуальная инверсия Малкинских скважин (с SDs 2 Вт/м·К и 0,1 К) дала в целом схожую реконструкцию, подтверждая процесс потепления в XX в. в интервале от 0,5 до 1,5°C. На рис. 3 показано это путем суммирования результатов комплексной инверсии всех девяти записей наблюдений для трех случаев с различной погрешностью.

#### Скважина «Елизово» (Е-1)

Была пробурена в 1984 г. (глубина 2850 м) и характеризуется умеренной теплоотдачей – 60 мВт/м<sup>2</sup>. Некоторая инфильтрация воды наблюдалась на глубине 1000–2000 м, что понижает температурный градиент менее чем на 20 мК/м, несмотря на очень низкий коэффициент теплопроводности – 1,55 Вт/м·К (Смирнов и др., 1991). Термометрию проводили шесть раз до глубины 400 м, и все графики  $T(z)$  в основном похожи, но показывают крошечные вариации – от 0,1 до 0,2 К – без четкой температурной зависимости. Временная нестабильность температур хорошо подтверждается мониторингом температуры в течение года на глубине 325 м, который дает вариации от 0,02 до 0,04 К в день. Результаты инверсии за 2002 г. на рис. 4 показывают неожиданно обширный прогрев 2 К/100 в год даже в случае применения свободной инверсии с заранее заданными значениями SDs (2 Вт/м·К, 0,1 К).

#### Скважины «Юго-Западная» (UZ-2) и R-2

Температурные данные скв. UZ-2 показывают зону просачивания в самой верхней части на глубине 60 м, следующей за зоной понижения температурного градиента с глубиной, что может означать проявление движения воды вверх в диапазоне глубин от 60 до 210 м. Ниже 210 м градиент относительно постоянен. Из-за гидрогеологического нарушения среды реконструкция изменения температуры по времени у поверхности земли проблематична и для скв. UZ-2 не было найдено определенного решения.

Данные по скв. R-2 говорят о присутствии просачивания, и реконструкция изменения температуры по времени у поверхности земли ненадежна. Решение свободной инверсии со значениями SDs (2Вт/м·К, 0,1 К) предполагает прогрев 1,4 К с начала XX в.

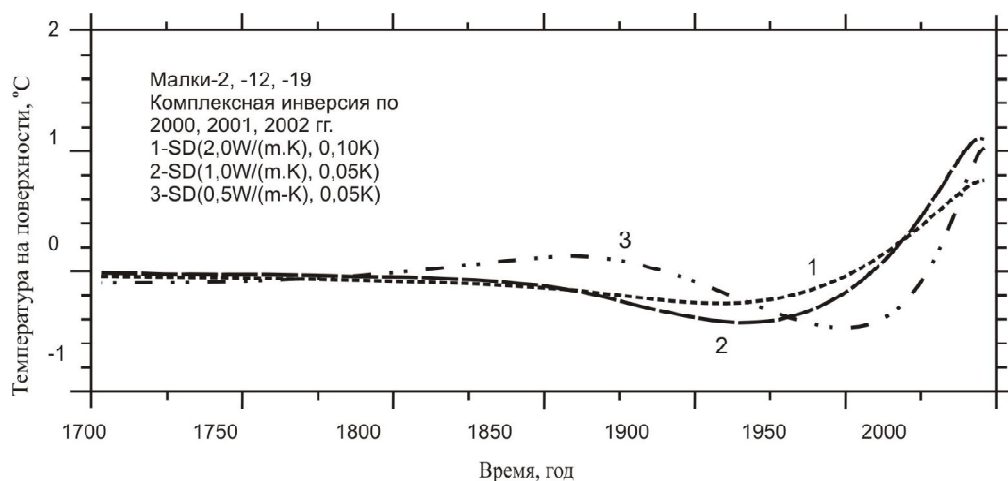


Рис. 3. Инверсия термограмм со скважин в Малках

Fig. 3. Inversion of the temperature logs from Malki holes

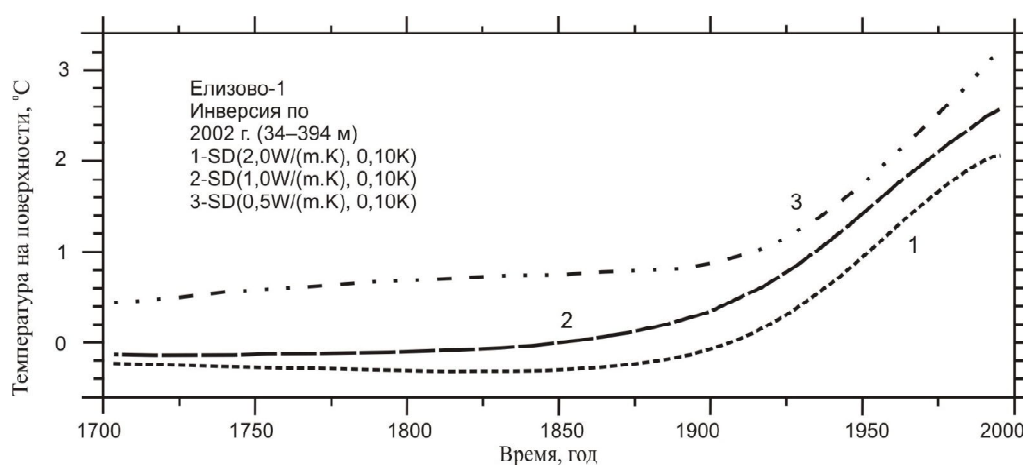


Рис. 4. Инверсия температурных диаграмм скважины «Елизово»

Fig. 4. Inversion of the temperature logs from the Yelizovo borehole

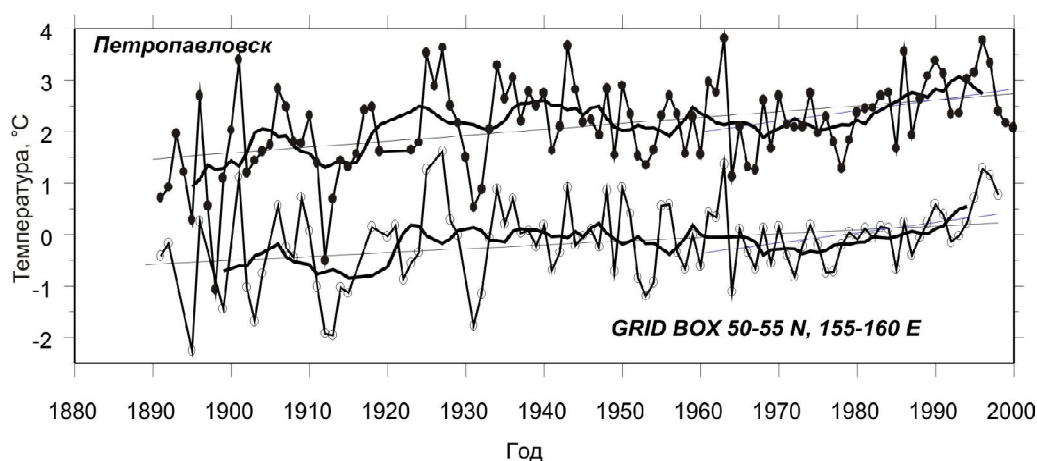


Рис. 5. Изменение температур воздуха у поверхности земли для Камчатки, по метеорологическим данным

Fig. 5. Surface air temperature series change for Kamchatka, from meteorological data

#### СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Описанные изменения температуры по времени у поверхности земли, инвертированные по термограммам, измеренным в скважинах на Камчатке,

независимо от разброса данных и потенциального действия миграционных вод подтверждают потепление климата на  $1-1,5^{\circ}\text{C}$ , характерного для прошлого столетия, с увеличивающейся скоростью потепления в последние два-три десятилетия. Предшествующий более холодный период в XVIII–XIX вв.

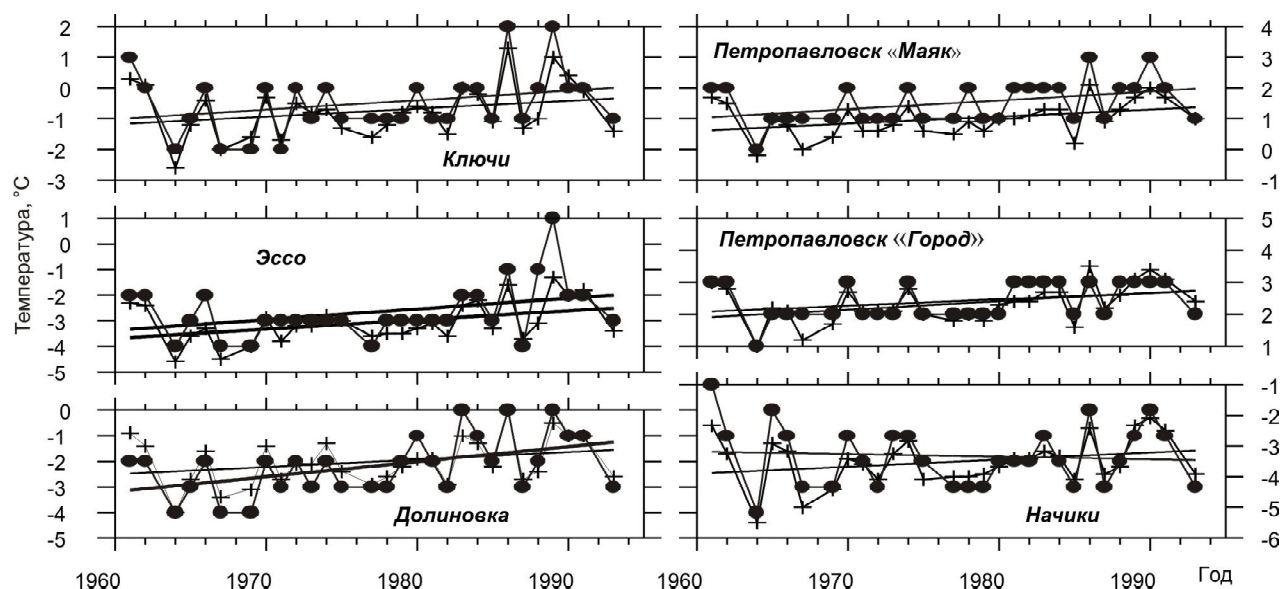


Рис. 6. Температуры воздуха у поверхности земли (крестики) и почвы (кружочки), зарегистрированные на шести метеостанциях Камчатки

Fig. 6. Surface air temperatures (crosses) and soil temperatures (circles) recorded at six meteorological stations

Таблица 2. Средние скорости потепления и средние температуры с 1960 по 1995 г. на шести станциях  
Table 2. Mean warming rates and mean temperatures for period 1960–1995 at six stations

Метеостанция	Показатель	Воздух			Почва		
		средн.	макс.	мин.	средн.	макс.	мин.
Долиновка	Скорость, К/год	0,029	0,034	0,023	0,059	0,084	0,023
	Средняя, °С	-2,0	4,8	-8,3	-2,2	9,8	-10,7
Эссо	Скорость, К/год	0,036	0,056	0,020	0,042	0,083	0,057
	Средняя, °С	-3,1	3,0	-8,5	-2,7	8,8	-10,7
Ключи	Скорость, К/год	0,026	0,037	0,020	0,031	0,050	0,012
	Средняя, °С	-0,7	3,6	-4,9	-0,5	8,7	-7,3
Начики	Скорость, К/год	0,028	0,035	0,021	-0,010	0,029	-0,011
	Средняя, °С	-3,0	3,2	-8,9	-2,8	7,6	-10,7
Петропавловск «Маяк»	Скорость, К/год	0,023	0,024	0,004	0,029	0,034	0,006
	Средняя, °С	1,0	4,0	-1,1	1,5	9,0	-3,0
Петропавловск «Город»	Скорость, К/год	0,026	0,033	0,031	0,020	0,034	0,016
	Средняя, °С	2,3	5,5	-0,2	2,4	11,1	-2,9

нельзя исключить, но он точно не подтвержден. Этот результат хорошо согласуется с глобальными метеорологическими данными за последние 150 лет.

На рис. 5 показано сравнение измерений температуры воздуха у поверхности земли на метеостанции «Петропавловск» с глобальными метеорологическими данными. Обе временные серии практически идентичны. Прошлый век характеризуется средними значениями потепления 0,0115 К/год («Петропавловск») и/или 0,0074 К/год (глобальные метеоданные) соответственно. В 1960–1999 гг. скорость потепления увеличивается приблизительно до 0,02 К/год в обоих случаях.

Для того чтобы понять причины потепления за последние три-четыре десятилетия, были собраны долговременные серии температур воздуха и почвы, зарегистрированные на нескольких метеостанциях Центральной Камчатки (рис. 6). Все серии подтверждают (за исключением температуры почвы на

станции «Начики») потепление в 1960–1999 гг. с различными скоростями в пределах от 0,023 до 0,036 К/год для средних температур земной поверхности и/или 0,020–0,059 К/год – для температур почвы соответственно (табл. 2). Обычно почва теплее, но взаимосвязь между температурами почвы и земной поверхности не ясна и должна далее изучаться, особенно, что касается общей мощности и продолжительности снежного покрова.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Протяженные временные серии средних значений годовых температур воздуха Камчатки на рубеже XX в. показывают медленное увеличение температур с конца XIX в. до 1940-х гг., когда температура была относительно постоянной до конца 1960-х – начала 1970-х гг. (Jones et al., 1999), до наступления второго этапа потепления. Возможно, это было то потепление, которое М. И. Будько и другие советские климатологи интерпретировали как начало крупномас-

штабного климатического потепления (Budyko, 1977). Недавнее сильное потепление является типичным для всей Северной Азии, особенно для Восточной Сибири, и четко прослеживается на большей территории Тихоокеанского бассейна на широтах от 40 до 60° с. ш. (Rogers, Mosley-Thompson, 1999; Jones et al., 1999).

Автор благодарит чешских коллег В. Чермака и Я. Сафанду, с которыми проведены все полевые измерения в скважинах и интерпретация данных. Статья подготовлена по материалам доклада «Climate Change in Kamchatka, Evidence From the Underground» на совещании «Geothermal/Dendrochronological Paleoclimate Reconstruction across Eastern Margin of Eurasia», Matsuyama, Japan, 2002.

#### ЛИТЕРАТУРА

Смирнов Я. Б., Сугробов В. М., Яновский Ф. А. Земной тепловой поток Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 2. – С. 41–65.

Поступила в редакцию 08.07.2013 г.

Bodri L., Cermak V. Climate change of the last millennium inferred from borehole temperatures: results from the Czech Republic. Part 1 // Global Planet. Change. – 1995. – No. 11. – P. 111–125.

Budyko M. I. On present-day climatic studies // Tellus. – 1977. – No. 29. – P. 193–204.

Jones P. D., New M., Parker D. E. et al. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // Rev. Geophys. – 1999. – No. 37. – P. 173–199.

Rogers J. C., Mosley-Thompson E. Atlantic arctic cyclones and the mild Siberian winters of the 1980s // Geophys. Res. Letts. – 1999. – No. 22. – P. 799–802.

Stallman R. W. Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature // J. Geophys. Res. – 1963. – No. 70. – P. 2821–2827.

Sugrobov V. M., Yanovsky F. A. Terrestrial heat flow, estimation of deep temperature and seismicity of the Kamchatka region // Tectonophysics. – 1993. – No. 217. – P. 43–53.

## RECONSTRUCTION OF CLIMATE CHANGES IN KAMCHATKA BY BOREHOLE TEMPERATURE DATA

*E. I. Gordeev*

To be able to reconstruct the climate history in Kamchatka, a project was proposed to carry out a series of repeated precise temperature logs in a number of holes. These temperature logs were inverted into a model of climate changes of the past several hundred years with a special focus on the recent warming. This paper presents the results of the geothermal part of the Russian – Japanese – Czech joint project «Reconstruction of the climatic change from borehole temperature and tree rings in the Kamchatka Peninsula» (2000–2002). Altogether 33 temperature logs were performed in 12 holes (one up to six logs per hole) to depth of 400 meters located in a broad east-west strip (between 52 and 54 degrees of northern latitude) in Central Kamchatka. Temperature gradients vary in a broad interval of 10 to 60 mK/m and in some holes sizeable variations in subsurface temperatures due to advective heat transport by underground water was observed. Our data were complemented by older temperature profiles obtained in the early eighties (Смирнов и др., 1991) for heat flow determinations. These data are of poorer quality (accuracy of about 0.1 K) but they present valuable information on the subsurface temperature conditions existing some 20–25 years ago.

**Key words:** temperature in borehole, thermogram, climate change, modern warming.