

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ



4

ОКТЯБРЬ-ДЕКАБРЬ

ТОМ 1, 1997

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор
Мельников В.П.

Заместители главного редактора:
Каменский Р.М. Котляков В.М.

Ответственный секретарь *Фотиев С.М.*

Члены редколлегии:

*Алексеев В.Р., Арэ Ф.Э., Балобаев В.Т., Гаврилова М.К., Гиличинский Д.А.,
Гречишев С.Е., Дучков А.Д., Ершов Э.Д., Зотиков И.А., Изаксон В.Ю.,
Конищев В.Н., Лещиков Ф.Н., Мельников Е.С., Павлов А.В., Перльштейн Г.З.,
Романовский Н.Н., Соловьев И.Г., Соломонов Н.Г., Фролов А.Д., Хрусталев Л.Н.*

Адрес редакции: 117312, Москва, ул. Ферсмана 11, корпус 2, кв. 68
Объединенный научный совет по криологии Земли РАН
Редакция журнала „Криосфера Земли“. Тел. (095)124-54-22

Зав. редакцией *О. А. Кислова*
Художественный редактор *М. Г. Рудакова*
Технический редактор *О. М. Вараксина*
Компьютерная верстка *С. Ю. Арнгольд*
Корректор *В. В. Борисова*

Фотография на обложке *А. Р. Гептнера*
Исландия. Озеро Йокудльсалон у края ледника Брейдамеркурийёкудль

Сдано в набор 17.11.97. Подписано в печать 26.01.98. Формат 60×84 1/8. **Офсетная печать.**
Печ. л. 11,3. Уч.-изд. л. 10. Тираж 300 экз. Заказ № 464
Журнал зарегистрирован в Государственном Комитете
Российской Федерации по печати № 06.05.97 Регистр. № 016072

Научно-издательский центр ОИГМ СО РАН, 630090, Новосибирск, проспект Академика Комарова, 3,
тел: 39-64-30, E-Mail: criosph@uigpm.nsc.ru

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ КРИОСФЕРЫ ЗЕМЛИ СО РАН
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Основан в январе 1997	Периодичность 4 вып. в год	Том 1, № 4	Октябрь—декабрь 1997
--------------------------	-------------------------------	------------	-------------------------

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

- | | |
|---|---|
| Комаров И.А. Обобщение автомодельных и квазистационарных решений по моделированию сезонного промерзания—протаивания пород на основе метода возмущений | 3 |
|---|---|

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

- | | |
|---|----|
| Сулержицкий Л.Д., Романенко Ф.А. Возраст и расселение „мамонтовой“ фауны азиатского Заполярья (по радиоуглеродным данным) | 12 |
| Харрис С.А. Реликт позднечетвертичной мерзлоты на бывшем нунатаке Плато Маунтин (Юго-Западная Альберта) | 20 |
| Прик А. Лабораторное определение криогенного выветривания известняка в применении к горной мерзлоте (Плато Маунтин, Альберта, Канада) | 28 |

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

- | | |
|---|----|
| Дроздов Д.С. Оценка достоверности ландшафтной индикации инженерно-геокриологических условий при переходе от крупного масштаба к среднему при региональных работах в Западной Сибири | 35 |
| Васильев А.А., Дроздов Д.С. Методика и результаты крупномасштабных эколого-геологических исследований территорий рудных месторождений в криолитозоне | 42 |

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

- | | |
|--|----|
| Пустовойт Г.П. Учет изменчивости климата при обеспечении надежности оснований сооружений в криолитозоне | 50 |
| Горелик Я.Б., Феклистов В.Н., Нестеров А.Н. Термостабилизация свайных фундаментов локального сооружения на мерзлых грунтах | 54 |
| Каган А.А., Кривоногова Н.Ф. Надежность оснований сооружений в криолитозоне | 59 |
| Кузьмин Г.П. Повышение надежности работы воздушных охлаждающих устройств конвективного действия | 62 |
| Чжан Р.В. Особенности деформаций земляных плотин и водосбросных сооружений низкого напора в условиях вечной мерзлоты | 66 |
| Кондратьев В.Г. Деформации земляного полотна дорог на сильнольдистых вечномерзлых грунтах и методы их предотвращения | 72 |

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- | | |
|--|----|
| Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Иващенко А.И. Геоинформационный подход к изучению углеродных потоков в тундровых ландшафтах | 79 |
| Мельников Е.С., Конченко Л.А., Молчанова Л.С. Электронная ландшафтная основа циркумполярных карт экологического содержания для территории Российской Арктики | 85 |

ХРОНИКА

- | | |
|--|----|
| Михаил Иванович Сумгин — основоположник науки о мерзлых толщах земной коры (к 125-летию со дня рождения) | 89 |
| Содержание тома 1 | 91 |
| Алфавитный указатель | 94 |

**SIBERIAN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
EARTH CRYOSPHERE INSTITUTE**
SCIENTIFIC JOURNAL
EARTH CRYOSPHERE

Founded in January 1997	Quaterly	Vol. 1, No. 4	October—December 1997
----------------------------	----------	---------------	--------------------------

CONTENTS

PROBLEMS OF EARTH CRYOLOGY

- Komarov I.A. Generalisation of automodel and quasi-stationary solutions on modelling of freezing-melting process by perturbation methods 3

REGIONAL PROBLEMS OF EARTH CRYOLOGY

- Sulerzhitsky L.D., Romanenko F.A. Age and distribution of the „mammoth“ fauna of the polar region of Asia (*radiocarbon dating results*) 12
 Harris S.A. A relict of Late Quaternary permafrost on a former nunatak at Plateau Mountain, (*SW Alberta*) 20
 Prick A. Cryogenic weathering of limestones evaluated by laboratory techniques and applied to a mountain permafrost area (*Plateau Mountain, Alberta, Canada*) 28

ECOLOGICAL PROBLEMS OF EARTH CRYOLOGY

- Drozdov D.S. Reliability of landscape indication of engineering-geocryological conditions on transition from large- to medium-scale regional researches in West Siberia 35
 Vasiljev A.A., Drozdov D.S. Technique and results of large-scale ecologo-geological environmental research of ore fields in cryolitozone 42

RELIABILITY OF BASEMENTS AND STRUCTURES IN CRYOLITOZONE

- Pustovoit G.P. Account of climatic change in the design of the bases of structures on permafrost soils 50
 Gorelik Ya.B., Feclistov V.N., Nesterov A.N. Stabilisation of the pile bases of the local structure on the frozen ground 54
 Kagan A.A., Krivonogova N.F Reliability of the basements of structures in cryolitozone 59
 Kuzmin G.P. Improvement of the reliability of air convection type refrigeration units 62
 Zhang R.V. Deformation of earth-filled dams and low-pressure spillways in the permafrost area 66
 Kondratiev V.G. Deformation of roadbeds on icy permafrost ground and methods against it 72

GEOINFORMATION SYSTEMS

- Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Ivashchenko A.I. Geoinformation approach to investigation of carbon fluxes in tundra landscapes 79
 Melnikov E.S., Konchenko L.A., Molchanova L.S. Electronic landscape basis of ecological circumpolar maps for Russian Arctic 85

CHRONICLE

- Mikhail Ivanovich Sumgin, the founder of the new branch of knowledge: frozen layers of the Earth's crust (*commemoration of the 125-th anniversary*) 89
 Contents of volume 1 91
 Author's index of volume 1 94

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

SPC UIGGM SB RAS

NOVOSIBIRSK

© Издательство СО РАН
 © Институт арктических Земель СО РАН
 Криосфера Земли, 1997

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 3—11

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345.2

**ОБОБЩЕНИЕ АВТОМОДЕЛЬНЫХ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ
РЕШЕНИЙ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ—
ПРОТАИВАНИЯ ПОРОД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЗМУЩЕНИЙ**

И. А. Комаров

Московский государственный университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы Горы, Россия

Приводятся результаты моделирования процесса промерзания-оттаивания методом возмущений. Дано количественное сравнение с известными в геокриологии соотношениями Стефана, Лейбензона, Павлова, Балобаева, Кудрявцева, Фельдмана, Лукьянова-Головко.

Геокриология, прогноз, промерзание, оттаивание, метод возмущений

**GENERALIZATION OF AUTOMODEL AND QUASI-STATIONARY SOLUTIONS
ON MODELLING OF FREEZING-MELTING PROCESS BY PERTURBATION METHODS**

I. A. Komarov

Moscow State University, Department Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

Results of modelling of freezing-thawing process by perturbation methods are reported. Quantitative comparison with relations of Stefan, Laybenzon, Pavlov, Balobaev, Kudryavtsev, Feldman, Lukanov-Golovko, which are known in geocryology, are given.

Geocryology, prediction, freezing, perturbation methods

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, аналитические решения, в частности, автомодельные и квазистационарные, до сих пор широко применяются в геокриологии, являясь основой для прогнозных схем расчета, в том числе в нормативной литературе, и давая вполне удовлетворительное качественное и количественное сопоставление с данными натурных наблюдений. Сравнение точности различных формул для вычисления скорости промерзания—оттаивания, полученных на основе квазистационарного приближения, проведено [Вотякова, 1972], а затем более полно [Гречищев и др., 1980]. В последней работе основное внимание уделено вопросу об оптимальной точности расчетов, при учете различного числа влияющих на интенсивность процесса промерзания факторов. Однако все проанализированные соотношения Стефана, Бергrena, Хакимова, Докучаева, Павлова и Балобаева были получены авторами единным методом при предположении о линей-

ности профиля температур в промерзающей (оттаивающей) зоне и поэтому учет нестационарности реальных температурных полей (рис. 1) может привести к определенным корректировкам результата. С другой стороны, автомодельные решения широко используются как тестовые при численной реализации задач промерзания—оттаивания на ЭВМ. Поэтому оценки величин погрешностей, возникающих между точным (не стационарным) решением и его приближенным решением, полученным на основе квазистационарности, а также нахождение пределов применимости последних является достаточно актуальной задачей, которую мы решаем, используя метод малого параметра [Коздобра, 1975]. Применение метода возмущений позволяет провести на единой основе обобщение результатов, полученных также и другими методами, например балансовым методом Кудрявцева, и предложить ряд новых результатов, получение которых с

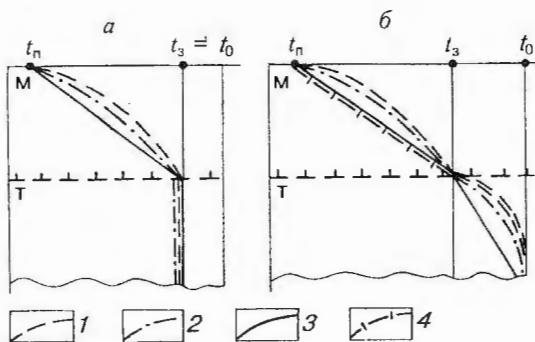


Рис. 1. Характер распределения температур в мерзлой и талой зонах массива.

При отсутствии теплообмена с подстилающими породами (а) и при его наличии (б): 1 — автомодельное решение по формуле (3) для случая а, и классическое решение (формула Неймана) для случая б; 2 — решение методом малого параметра (6) и (7) для а, по (10) для б; 3 — квазистационарное приближение (формула Стефана) для а, формула Крылова для б; 4 — решение методом Лейбензона (11) для б; t_n , t_0 , t_3 — соответственно, температура на поверхности пород, на подошве слоя нулевых годовых амплитуд, на границе раздела зон (температура начала замерзания).

помощью других методов проблематично. Рассмотрим наиболее простой случай.

а. Промерзание массива пород, начальная температура которого постоянна и равна температуре фазового перехода t_3 . Этот случай описывается автомодельной задачей Стефана (задача Ламэ-Клайперона). Температура на поверхности полубесконечного массива пород в начальный момент мгновенно становится постоянной и равной t_n . При этом появляется подвижная граница раздела фаз $\xi(\tau)$. Решение задачи известно [Основы ..., 1959] и имеет вид:

$$t_m(x, \tau) = t_n + (t_3 - t_n) \operatorname{erf}(x/2\sqrt{a_m \tau}) / \operatorname{d} / \operatorname{erf}(\beta/2\sqrt{a_m}), \quad \xi = \beta \sqrt{\tau}. \quad (1)$$

Здесь β определяется из уравнения: $z \exp(z^2) \operatorname{erf}(z) = C_m(t_n - t_3)/Q_\Phi \sqrt{\pi}$, а $z = \beta/2\sqrt{a_m}$; $C_m = \lambda_m/a_m$; где $\operatorname{erf}()$ — интеграл ошибок; λ_m , a_m , C_m — теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость мерзлых пород соответственно; Q_Φ — теплота фазовых переходов; x , τ — координата и время соответственно.

Уравнение (1) решается на ЭВМ с помощью численных методов, а приближенное решение получается путем разложения функций $\operatorname{erf}(z)$ и $\exp(-z^2)$ в ряды для малых z . Поскольку вышеуказанные ряды являются быстросходящимися, то при $z \ll 1$, можно ограничиться первыми членами разложения ряда. Подставляя эти значения в (1), получим:

$$2z = \delta = [2C_m(t_n - t_3)/Q_\Phi]^{1/2}, \text{ при } z \ll 1, \quad (2)$$

а, подставляя (2) в (1), получим известную формулу Стефана. Однако это же соотношение можно получить из решения исходной системы для случая линейной аппроксимации профиля температур (см. рис. 1), т. е. используя квазистационарное приближение, применимость которого связано с выполнением условия $z \ll 1$ в (2). Физически это обусловлено требованием, чтобы теплота, которая идет на перестройку поля в мерзлой зоне $C_m \Delta t$, была много меньше, чем та, которая идет на фазовые переходы, т. е. $C_m \Delta t \ll Q_\Phi$. В пределах, когда $C_m \Delta t \Rightarrow 0$, все подводимое тепло идет на фазовые переходы, а профиль температур будет линейным. Иными словами, применимость квазистационарного приближения обусловлена требованием, при котором изменение массы кристаллизующейся воды за время установления поля температур в зоне было ничтожно мало. Как следует из (2), формула Стефана при прочих равных условиях будет лучше работать для случаев: оттаивания сильнольдистых массивов; промерзания низин, торфяников с большим влагосодержанием и хуже, для водораздельных элементов рельефа, сложенных хорошо дренируемыми породами и т. д. Вышеприведенные соображения о правомочности использования квазистационарного приближения, для нахождения величины ξ являются качественными, поскольку не указывают границ применимости. Для такой оценки воспользуемся методом малого параметра. Малый параметр может вытекать из постановки задачи или вводится искусственно. Для обсуждаемого случая величина малого параметра имеет совершенно ясный физический смысл, указанный выше в соотношении (2). При введении новых переменных: $T = (t_3 - t)/(t_3 - t_n)$, $\varepsilon = C_m(t_3 - t_n)/Q_\Phi$ и $\mu = \varepsilon t_a$ исходная краевая задача приобретает вид:

$$\varepsilon \frac{\partial T}{\partial \mu} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad \mu > 0 \times \in (0, \xi(\mu)); \quad -\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi(\mu)} = \frac{d\xi}{d\mu};$$

$$T(\infty, \mu) = T(x, 0) = 0; \quad T(0, \mu) = 1;$$

$$T_m(\xi(\mu), \mu) = 0.$$

По методу возмущений решение поставленной задачи отыскивается в виде рядов по изменяющимся степеням малого параметра:

$$T = \sum \varepsilon^n T_n = T_0 + \varepsilon T_1 + \varepsilon^2 T_2; \\ \mu = \sum \varepsilon^n \mu_n = \mu_0 + \varepsilon \mu_1 + \varepsilon^2 \mu_2, \dots \quad (3)$$

Ряды (3) подставляем в преобразованную систему уравнений, почленно дифференцируем и затем приравниваем члены при одинаковых степенях. Вид решения, с точностью до 3-го члена ряда, имеет вид:

ОБОБЩЕНИЕ АВТОМОДЕЛЬНЫХ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ РЕШЕНИЙ

$$T = 1 - \frac{x}{\xi} \left[1 - \frac{\varepsilon}{6} \left(\frac{x^2}{\xi^2} - 1 \right) + \frac{\varepsilon^2}{4} \left(\frac{x^4}{10\xi^4} + \frac{x^2}{9\xi^4} - \dots \right) \right], \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\xi^2}{2} \left(1 + \frac{\varepsilon}{6} - \frac{2\varepsilon^2}{45} + \dots \right). \quad (5)$$

Анализ рядов (4, 5) показывает, что выражение для первого члена разложения ($n = 0$ — „нулевое“ приближение) в исходных переменных соответствует линейному (стационарному) профилю температур в мерзлой зоне (см. рис. 1) и величине мощности этой зоны ξ , рассчитанной по формуле Стефана. Второе ($n = 1$) и третье ($n = 2$) слагаемые рядов являются „нестационарными“ добавками к невозмущенному (стационарному) решению. Результаты сравнения значений ξ , рассчитанные по формуле Стефана с помощью ряда (5) и автомодельной задачи (1), которая принимается за „точное“ решение, представлены на рис. 2. Из него видно, что при малых $\varepsilon < 0,15$ использование квазистационарного приближения правоправомочно с погрешностью менее 10 %, а следовательно, оценка глубины сезонного промерзания (оттаивания) по формуле Стефана не приводит к существенным погрешностям. Однако, когда соотношение теплоаккумуляционной способности массива пород и динамики его влажностного поля таково, что $\varepsilon > 0,15$, то для нахождения температурных полей и величины ξ целесообразно использование автомодельного решения или решения (4, 5). Причем для широчайшего спектра природных условий, когда $\varepsilon < 2,0$, три слагаемые ряда (7) обеспечивают удовлетворительную точность оценки ξ .

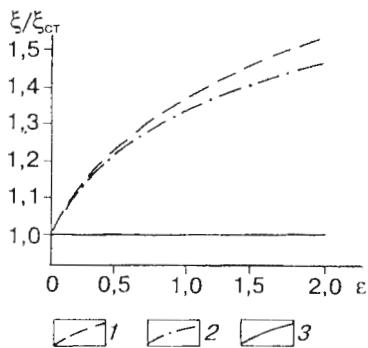


Рис. 2. Сравнение расчетных значений мощности зоны промерзания нормированной по соответствующей величине $\xi_{\text{ст}}$, оцененной по формуле Стефана, в зависимости от величины малого параметра ε .

1 — автомодельное решение (3), принимаемое за точное; 2 — приближенное решение методом малого параметра, с точностью до 3-го члена асимптотического ряда (7); 3 — квазистационарное решение (формула Стефана).

6. Учет теплообмена с подстилающими породами. Этот случай описывается классической автомодельной задачей Стефана [Основы..., 1974]. Исходя из соображений о целесообразности компактного изложения материала запишем сразу обобщенное соотношение для нахождения β из задачи промерзания, при наличии снежного покрова на поверхности мощностью $l_{\text{сн}}$, который меняется во времени по параболическому закону $l_{\text{сн}}(\tau) = \gamma \sqrt{\tau}$. Для полубесконечного массива при постоянной температуре поверхности, задача сводится к автомодельной и известно ее точное решение [Фельдман, 1977]. Вид трансцендентного уравнения с учетом соотношений $\beta(a_m)^{1/2} = 2z = \delta$ будет:

$$z = \frac{\delta}{2} = \frac{C_m(t_3 - t_n) \exp(-z^2)}{\sqrt{\pi} Q_\Phi \operatorname{erf}(z) + (\lambda_m / \lambda_{\text{сн}})(a_{\text{сн}} / a_m)^{1/2} \operatorname{erf}(\gamma / 2\sqrt{a_{\text{сн}}})} - \frac{C_{\text{сн}}(t_0 - t_3) \exp(-z^2 a_m / a_t)}{Q_\Phi (a_m / a_t)^{1/2} \operatorname{erfc}(z(a_m / a_t)^{1/2})}, \quad (6)$$

где индексы „т“ и „сн“ относятся соответственно к талым породам и снежному покрову.

Когда $\gamma = 0$, уравнение (6) дает соотношение для оценки β в классической задаче Стефана, а если и $t_0 = t_3$, то (6) переходит в (1). При решении рассматриваемой задачи методом возмущений, ясное физическое обоснование введенного малого параметра, которое было дано выше, уже неприемлемо. Малый параметр вводится более искусственным способом [Комаров и др., 1987], но так, чтобы величина безразмерного параметра ε для переменных $\varepsilon_1 = C_m(t_3 - t_n)/Q_\Phi$ и $\varepsilon_2 = C_t(t_0 - t_3)/Q_\Phi$ в реальных условиях имела порядок $\varepsilon < 1$ и могла считаться малым числом. Тогда малый параметр вводится в уравнение (6) при $\gamma = 0$ следующим способом. Обозначая через $f(\delta)$ функцию, которая получится, если заменить $z = \delta/2$ и разделить на правую часть равенства (6), получим: $f(\delta) = \varepsilon^2$, при $\varepsilon \in [0, 1]$. Воспользовавшись тем, что $f(\varepsilon)$ является аналитической функцией параметра ε и может быть разложена в ряд для его малых значений, корень уравнения (6) представляется рядом по степеням параметра возмущения ε :

$$\delta(\varepsilon) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \delta_n \varepsilon^n, \text{ где } \delta_n :$$

$$\delta = \frac{1}{n!} \left(\frac{d}{dS} \right)^{n-1} \left[\left(\frac{\delta}{\{f(\delta)\}} \right) 1/2 \right]_{\delta=0}. \quad (7)$$

Ограничиваюсь первыми 2 коэффициентами ряда (7), имеющими вид: $\delta_1 = \left(\frac{2C_m |t_n|}{Q_\Phi} \right)^{1/2}$ и $\delta_2 = -\frac{C_t t_0}{Q_\Phi} \left(\frac{a_t}{a_m \pi} \right)^{1/2}$, получим выражение для $\xi(\tau)$:

$$\xi = \left(\frac{2\lambda_m |t_n|}{Q_\phi} \tau \right)^{1/2} - \frac{|t_0|}{Q_\phi} \left(\frac{\lambda_t C_t}{\pi} \tau \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Интересно отметить, что первое слагаемое имеет вид формулы Стефана, подкоренное выражение которого в дальнейшем будем обозначать ξ_{ct}^2 , а второе слагаемое обозначим S . Для случаев, когда $\varepsilon < 1$, формула (8) дает удовлетворительное сопоставление с данными, полученными из автомодельной задачи, и близка по точности к оценке ξ по формуле Лейбензона [Основы ..., 1974]:

$$\xi = (\xi_{ct}^2 + S^2)^{1/2} - S; \quad S = C_t |t_0| (a_t \tau / \pi)^{1/2} / Q_\phi. \quad (9)$$

Для широкого спектра натурных условий сезонного промерзания величина $S < 1$ и поэтому $\xi_{ct}^2 \gg S^2$, тогда уравнение (9) становится идентичным решению, полученному с помощью двух членов ряда (8).

Квазистационарное решение задачи промерзания при условии постоянства величины теплопотока из подстилающих пород ($q_t = \text{const}$) было дано Крыловым [Основы ..., 1959]. Решением является уравнение типа (9), где $S = q_t \tau / Q_\phi$. Войтковский (1954), Балобаев (1966), Павлов (1975) получили подобные решения путем интегрирования условия Стефана при нестационарном потоке снизу, однако в отличие от Лейбензона профиль в нижней (талой) зоне ими не находился из решения подчиненной задачи с привлечением различного рода эмпирической информации. В частности, решение Павлова (1975) представляется в виде уравнения (9):

$$S = \frac{\lambda_t t_0' \tau^{1/2}}{(\pi a_t)^{1/2} (Q_\phi + 1,2C_t t_0' \pi^{-1/2})} \quad \text{и}$$

$$\xi_{ct}^2 = \frac{2\lambda_t \tau}{Q_\phi + 1,2C_t t_0' \pi^{-1/2}},$$

где t_0' — усредненное значение температуры, которое используется вместо задаваемого начального распределения в талой зоне $t_t(x, 0)$ и может определяться либо как среднеинтегральная в слое нулевых годовых амплитуд, либо на основании наблюдений на стационарах.

в. Температура на поверхности меняется по периодическому закону, учитывается теплообмен с подстилающими породами. Рассмотрим аналогичную задачу (пункт б) при условии, что на поверхности пород температура изменяется по периодическому закону.

Приближенное решение задачи получено Кудрявцевым [Основы ..., 1975], основная идея подхода которого заключается в том, что вид температурного профиля в слое нулевых годовых

амплитуд H_0 задается заведомо искаженным относительно истинного, но таким образом, чтобы выполнялись условия баланса тепла (теплообратов) в этом слое за определенный период времени, равный году T . Таким образом, уравнение теплопроводности удовлетворялось в среднем. Для случая, когда теплофизические характеристики в талом и мерзлом состоянии равны, а температурная сдвигка отсутствует, выражение для нахождения величины мощности ξ имеет вид [Основы ..., 1975]:

$$\xi = \frac{2(A_0 - |t_0|)(\lambda T C)^{1/2}}{\pi^{1/2}} + \frac{(2A_{cp} \xi_{2c} C + \xi Q_\phi)Q_\phi(\lambda T / \pi C)^{1/2}}{2A_{cp} \xi_{2c} C + Q_\phi(\lambda T / \pi C)^{1/2}} / 2A_{cp} C + Q_\phi, \quad (10)$$

$$\xi_{2c} = \frac{2(A_0 - |t_0|)(TC\lambda/\pi)}{2A_{cp} C + Q_\phi};$$

$$A_{cp} = \left[(A_0 - |t_0|) / \ln \frac{A_0 + Q_\phi/2C}{|t_0| + Q_\phi/2C} \right] - \frac{Q_\phi}{2C};$$

трансцендентного уравнения, которое решается численным методом.

Соотношение между значениями амплитуд A_0, A_{cp}, A_{np} (соответственно, максимальной, средней и приведенной) дано на рис. 3.

В зависимости от соотношения теплообратов, идущих на фазовые переходы Q_w и на перестройку температурного поля в мерзлой и талой зонах, Q_c принципиально могут реализоваться два предельных случая: первый, когда $Q_w \ll Q_c$ характерный, например, для промерзания неводонасыщенных пород. Тогда $A_{np} \Rightarrow A_{cp}$ и величина ξ , исходя из (10), будет находиться по известному соотношению для среды, в которой отсутствуют фазовые переходы:

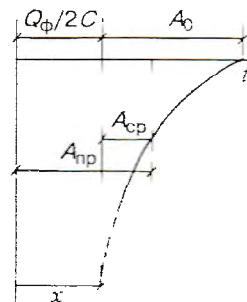


Рис. 3. Профиль затухания амплитуды по глубине слоя нулевых годовых амплитуд (по В. А. Кудрявцеву), здесь A_0, A_{cp}, A_{np} — соответственно амплитуда на поверхности, средняя и приведенная амплитуда.

Q_ϕ — тепло, идущее на фазовые переходы, C — теплоемкость.

$\xi = (\lambda T/C\pi)^{1/2} \ln (A_0/|t_0|)$, где $\xi = H_0$; второй, когда $Q_w \gg Q_c$ (промерзание увлажненных пород, оттаивание сильнольдистых массивов и т. д.). Тогда, как это следует из рис. 3, величина $A_{np} \Rightarrow Q_\phi/2C$, а $A_{cp} \Rightarrow 0$. Оценим условия когда это реализуется, введя переменные $\epsilon_1 = 2CA_0/Q_\phi = \alpha$ и $\epsilon_2 = 2C|t_0|/Q_\phi = \beta$, как это сделано В. Е. Романовским, построившим на их основе номограммы для расчета по формуле Кудрявцева. Но в пунктах a , b показано, что параметры такой структуры полностью аналогичны введенному малому параметру ϵ . Параметры возмущений будут малы (т. е. $\epsilon_1 \ll 1$ и $\epsilon_2 \ll 1$) в случае, когда $Q_\phi \gg 2CA_0$ и $Q_\phi \gg 2C|t_0|$. Преобразуя выражение для средней амплитуды (10) путем деления числителя и знаменателя на $Q_\phi/2C$, получим, что $A_{cp} \Rightarrow 0$, когда с заданной точностью выполняются соотношения $\ln(\epsilon_1 + 1) \cong \epsilon_1$ и $\ln(\epsilon_2 + 1) \cong \epsilon_2$. Формула Кудрявцева (10) для случая, когда $A_{cp} = 0$ существенно упрощается и после преобразований сводится к рассмотренному уже типу квадратного уравнения (9), где $S = [2(A_0 - |t_0|)(\lambda T C/\pi)^{1/2}]/Q_\phi$, а $\xi_{ct}^2 = 2\lambda(A_0 - |t_0|)T/\pi Q_\phi$. Выражение является аналогом формулы Лейбензона для фиксированного диапазона времени равного T (при знаке “-“ перед S). На рис. 4 приведены результаты расчетов по квадратному уравнению (9) и формуле (10). Сравнение показывает, что в широчайшем диапазоне природных условий, в котором реализуются соотношения $0 \leq \epsilon_1(\beta) \leq 3,0 \leq \epsilon_2(\alpha) \leq 9,0$, ошибка расчета не превышает 20 %, а в спектре часто встречающихся условий она меньше величины 13–15 %. Можно отметить еще один предельный случай, возникающий даже тогда, когда теплообороты, идущие на фазовые переходы, сопоставимы с теплооборотами, идущими на перестройку температурного поля. Он реализуется в том случае, когда величина

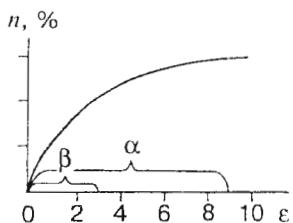


Рис. 4. Зависимость погрешности $n, \%$ результатов расчета величины мощности зоны промерзания ξ по формуле Кудрявцева (10) и по уравнению типа (9) в зависимости от величины малого параметра ϵ .

α и β — величины малого параметра по среднегодовой температуре и ее амплитуде соответственно.

амплитуды A_0 становится близка к $|t_0|$, т. е. $A_0/|t_0| \Rightarrow 1$, и $\alpha \Rightarrow \beta$. Тогда разлагая величину $\ln((\alpha + 1)/(\beta + 1))$ в ряд, при условии, что $(\alpha + 1)/(\beta + 1) \Rightarrow 1$ и ряд быстро сходится, можно ограничиться первым членом разложения в ряд. Тогда логарифмический профиль температуры можно заменить на линейный (см. рис. 3), а величину теплооборотов очень просто оценить по величине площади треугольника. Для практических целей, ошибка расчета по линейному профилю не превышает 20 %, если выполняется условие: $[A_0 + Q_\phi/2C]/[|t_0| + Q_\phi/2C] < < 1,5$, которое может реализоваться, например, для районов с морским типом сезонного промерзания (по амплитуде) и устойчивым (по среднегодовой температуре) (все по классификации В. А. Кудрявцева).

г. Учет наличия на поверхности снежного покрова (слоя изоляции) с заданным во времени законом снегонакопления. Автомодельная задача рассмотрена в [Фельдман, 1977], где для ее реализации использовалась параболическая аппроксимация закона увеличения мощности снежного покрова во времени, температура на поверхности задавалась постоянной $t_n = \text{const}$. Тогда положение фронта определяется по уравнению (1), где β находится из (6). Рассмотрим решение этой задачи методом малого параметра для случая, когда $\gamma > 0$. Корень уравнения (6) будет представляться рядом по степеням ϵ^2 , в отличии от случая $\gamma = 0$, и тогда:

$$\delta(\epsilon) = \sum \delta_n \epsilon^{2n}. \quad (11)$$

Однако полностью реализовать задачу во всем диапазоне величин γ не удается, поскольку для малых $\gamma \ll 1$ (мощность снежного слоя не велика), для обеспечения заданной точности определения положения подвижной границы нужно использовать много членов ряда (11), но даже в предельном случае, когда $\gamma = 0$, коэффициенты ряда (11) не переходят в коэффициенты ряда (7), т. е. разложение меняется скачком, хотя из физических соображений следует, что точное решение уравнения (6) при $\gamma \Rightarrow 0$ должно стремится к точному решению задачи без изоляции. Действительно уравнение (6) тогда, когда $\gamma = 0$ переходит в известное трансцендентное уравнение, полученное при решении классической автомодельной задачи Стефана. Таким образом, в рамках единого асимптотического разложения реализовать задачу с произвольной величиной мощности снежного покрова не удается и требуется определенная ее дифференциация, в частности условное разделение потенциально возможной мощности снега (изоляции) на два случая: „тонкого“ и „толстого“. Несмотря на то, что такой прием обусловлен исключительно специ-

фикой используемого математического аппарата, он может быть физически интерпретирован.

Задача с „толстым“ слоем изоляции. Корень уравнения (6) будет описываться рядом со степенями ε^2 (11), где коэффициент δ_n задается как: $\delta = \frac{1}{n!} \left(\frac{d}{d\delta} \right)^{n-1} \left[\left(\frac{\delta}{f(\delta)} \right)^n \right] |_{\delta=0}$, где первые коэффициенты ряда имеют вид:

$$\delta_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{C_m |t_n| \lambda_{ch}}{Q_\phi \lambda_m \operatorname{erf}(\beta/2 \sqrt{a_{ch}})} \left(\frac{a_m}{a_{ch}} \right)^{1/2} - \frac{C_t |t_0|}{Q_\phi} \left(\frac{a_t}{a_m} \right)^{1/2} \right) \text{ и}$$

$$\delta_2 = \frac{-\delta_1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{C_m |t_n|}{Q_\phi} \frac{C_{ch} \lambda_{ch}}{\operatorname{erf}(\beta/2 \sqrt{a_{ch}})} + \frac{C_t |t_0|}{Q_\phi} \right).$$

Формула для нахождения β по (1) запишется в виде: $\beta = \sqrt{a_m} (\delta_1 + \delta_2) = \beta_1 + \beta_2$.

Задача с „тонким“ слоем изоляции. В связи с невозможностью реализации задачи для случая единого разложения воспользуемся приемом, примененным выше, а именно — разложением функций $\exp(z)$ и $\operatorname{erf}(z)$ в ряд. Подставив их приближенные значения в уравнение (6) и отбросив слагаемые, имеющие порядок $0(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)$, получаем для определения корней выражения (8) квадратное уравнение:

$$A\delta^2 + B\delta + C = 0, \quad (12)$$

$$A = 1 - \frac{\lambda_m}{\lambda_{ch}} \left(\frac{a_{ch}}{a_t} \right)^{1/2} \operatorname{erf}(\gamma/2 \sqrt{a_{ch}}),$$

$$B = \sqrt{\pi} \frac{\lambda_m}{\lambda_{ch}} \left(\frac{a_{ch}}{a_m} \right)^{1/2} \operatorname{erf}(\beta/\sqrt{a_{ch}}) +$$

$$+ \frac{C_m |t_n|}{\sqrt{\pi} Q_\phi} \left(\frac{a_m}{a_t} \right)^{1/2} + \frac{C_t |t_0|}{Q_\phi} \left(\frac{a_t}{a_m} \right)^{1/2} > 0,$$

$$C = 2 \left(\frac{C_t |t_0| (a_t a_{ch})^{1/2} \lambda_m}{Q_\phi a_m \lambda_{ch}} \operatorname{erf}(\beta/\sqrt{a_{ch}}) - \frac{C_m |t_n|}{Q_\phi} \right) < 0.$$

На рис. 5 представлены результаты сравнения величин, рассчитанных по квадратному (12) и трансцендентному (6) уравнениям, показавшие, что предложенная формула (12) может быть применена для практического использования (погрешность не выше 15—20 %) в случаях, когда величина темпа снегонакопления γ менее $\gamma < 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{ч}^{1/2}$, теплопроводность пород в мерзлом и талом состояниях изменяется в диапазоне $0,6 < \lambda_m < 2 \text{ вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, а слоя снега $\lambda_{ch} 5 \cdot 10^{-2} < \lambda_{ch} < 2 \text{ Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$, т. е. от значений, близких к теплопроводности воздуха до льда; значений температуры на поверхности промерзающих пород $t_n = -1 \div -20^\circ\text{C}$ и на глубине нулевых годовых амплитуд $t_0 > 0$. Формула применима при изменении параметра $\varepsilon_1 =$

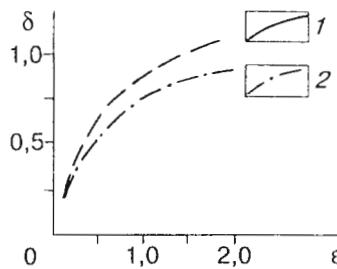


Рис. 5. Сравнение результатов расчета параметра δ , определяющего протяженность зоны промерзания при наличии снежного покрова от величины малого параметра ε .

1 — по формуле Фельдмана (6) (автомодельное решение); 2 — по формуле (12) (метод малого параметра).

$= C_m |t_n| / Q_\phi$ в области значений $0,01 < \varepsilon < 1,3$ соответствующих, например диапазону изменений величины теплоты фазовых переходов $12\,000 < Q_\phi < 336\,000 \text{ кДж}/\text{м}^3$, а также при соотношении параметров $\varepsilon_1/\varepsilon_2 > 0,5$. Таким образом, предложенная формула (12) применима для широкого спектра природных условий протекания процесса и имеет сходную структуру с формулами ряда авторов: Павлова, Чернядьева, Хакимова и др., рассматривавших задачи промерзания для квазистационарного приближения. Учет теплоизоляции осуществлялся ими с помощью метода эквивалентного слоя. Заменяя наблюдавшуюся в натурных условиях мощность снежного покрова l_{ch} на эквивалентную (фиктивную) мощность l_s , учитывающую термическое сопротивление этого покрова, была рассчитана по (9) глубина промерзания, где $S = l_{ch} \lambda_m / \lambda_{ch}$.

д. Влияние теплообмена с приземным слоем воздуха и продольно фильтрующейся жидкостью. Идея метода эквивалентного слоя может использоваться и для учета интенсивности теплообмена с приземным слоем воздуха. Тогда можно записать, что $l_s = (\lambda_m / \lambda_b) l_b = \lambda_m / \alpha_t$, где l_b и λ_b — мощность эквивалентного слоя и его эффективная (с учетом конвекции) теплопроводность; α_t — коэффициент турбулентного теплообмена. Поскольку экспериментальное нахождение величин l_b и λ_b методически и технически затруднено, то, следуя работе [Павлов, 1975], глубину сезонного промерзания можно оценить с помощью соотношения типа (9), где $S = \lambda_m / \alpha_t$, а $\xi_{ct}^2 = 2\lambda_m t_{zz} / Q_\phi$; здесь $t_{zz} = t_{zz} + (R - LE) / \alpha_t$ — приведенная температура воздуха, R — радиационный баланс поверхности, LE — затраты тепла на испарение. Анализ указанных соотношений для оценки величины S показывает, что с точки зрения физического смысла она соответ-

ствует величине l_3 , характеризующей эквивалентную мощность некой фиктивной промерзающей насыпи, сложенной породами той же литологической разности, что и в натуре, которая учитывает алгебраическую добавку к величине ξ , полученной по формуле Стефана за счет наличия на поверхности покровов или изоляции; влияния конвективного теплообмена с приземным слоем воздуха или водным потоком поверхностного стока; влияния теплового потока из подстилающих пород. Аналогично может рассматриваться случай промерзания водоносного горизонта при учете взаимодействия фронта промерзания с продольно фильтрующейся водой. Здесь на дневной поверхности и на фронте промерзания $\xi(\tau)$ заданы граничные условия 3-го рода, интенсивность теплообмена на которых пропорциональна коэффициентам турбулентного теплообмена α_T воздуха в приземном слое и α_∞ — теплообмена с фильтрующейся жидкостью. На поверхности промерзающего массива имеется снежный покров со средней за период промерзания мощностью l_{ch} . Теплоперенос в покрове и мерзлой зоне пород происходит кондуктивным путем, а на границе раздела реализуются условия идеального контакта. Решение методом малого параметра с точностью до 2 членов ряда имеет вид:

$$\begin{aligned} \nu = -\frac{1}{\psi^2} [\psi\eta - \ln \frac{1-\psi(1-\eta)}{1-\psi}] + \\ + \varepsilon \left[\frac{2+\eta}{3(1+\eta)^2} \eta - \frac{2}{3\psi} \ln \frac{1-\psi(1+\eta)}{1-\psi} + \right. \\ \left. + \frac{\psi+2}{3} \left[\frac{\eta}{\eta+1} + \psi \ln \frac{(1+\eta)(1-\psi)}{1-\psi(1+\eta)} \right] \right] + \varepsilon^2 \{ \dots \}, \quad (13) \end{aligned}$$

где $\psi = \frac{\alpha_\infty(t_\infty - t_3)}{\lambda_M B(t_{B3} - t_n)}$; $B = \frac{1}{\lambda_M [(1/\alpha_T) + (l_{ch}/\lambda_{ch})]}$; $\nu = a_M \tau B^2 \varepsilon$; $\eta = \xi B$; $\varepsilon = \frac{C_M(t_3 - t_n)}{Q_\Phi + C_\infty(t_\infty - t_3)}$; t_∞ — среднеобъемная температура фильтрующейся воды; ν , η , ψ — безразмерные параметры; ε — малый параметр; B — мощность эквивалентного слоя (l_3).

Сравнение расчетных данных, полученных по (13) и по уравнению из [Лукьянов и др., 1957], при наличии продольной фильтрации показало удовлетворительное совпадение в диапазоне $\varepsilon \leq 0,5$ при использовании двух членов асимптотического разложения (рис. 6).

е. Динамика промерзания при произвольном виде зависимости мощности снежного покрова и температуры дневной поверхности от времени. Задача промерзания при произвольном виде зависимостей температуры поверхности и мощности покрова от времени имеет вид:

$$\frac{\partial t_{ch}(x, \tau)}{\partial \tau} = a_{ch} \frac{\partial^2 t_{ch}(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (14)$$

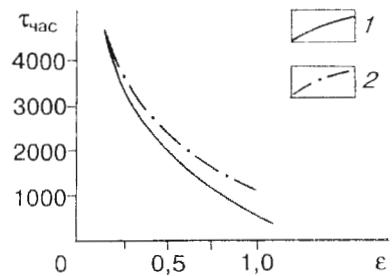


Рис. 6. Сравнение расчетных значений времени промерзания τ фиксированной зоны мощностью ξ при наличии осевой фронту фильтрации воды, от величины малого параметра ε .

1 — по модифицированной формуле Лукьянова—Головко; 2 — методом малого параметра для двух членов ряда (15).

$$\frac{\partial t_M(x, \tau)}{\partial \tau} = a_M \frac{\partial^2 t_M(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial t_T(x, \tau)}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 t_T(x, \tau)}{\partial x^2};$$

$$t_{dn.p.}(-l_{ch}(\tau), \tau) = \varphi(\tau), \quad (15)$$

$$t_T(x, 0) = \psi(x), \quad t_M(0, \tau) = t_n(0, \tau),$$

$$t_M(\xi(\tau), \tau) = t_T(\xi(\tau), \tau) = t_3,$$

$$\lambda_M \frac{\partial t_M}{\partial x}(0, \tau) = \lambda_{ch} \frac{\partial t_{ch}}{\partial x}(0, \tau),$$

$$\pm Q_\Phi \frac{d\xi}{d\tau} = \lambda_T \frac{\partial t_T}{\partial x}|_{x=\xi} - \lambda_M \frac{\partial t_M}{\partial x}|_{x=\xi}, \quad (16)$$

$$(t_T(x, \tau) - gx - t_3)^2 dx < \infty$$

$$\text{или } |t_T(x, \tau)| < M. \quad (17)$$

На нижней границе условие (17) задает либо геотермический градиент, либо предполагается ограниченность температуры. Считается, что начальные и граничные условия являются гладкими функциями и, если это необходимо, выполняются условия их согласования. Решение такой общей задачи рассматривалось в [Комаров и др., 1986, 1987]. При этих предпосылках известными методами можно доказать теорему существования и единственности решения данной задачи. Как и для автомодельной задачи (см. д) в рамках единого асимптотического разложения решить задачу не удается и требуется определенная дифференциация, условное разделение потенциально возможной мощности снежного покрова на два случая: „тонкого“ и „толстого“ слоя изоляции. Для этого введем безразмерный малый параметр ε следующим образом. Заменим толщину слоя изоляции $l_{ch}(\tau)$ в условии (15) на функцию $\varepsilon^\chi l_{ch}(\tau)$, где χ пробегает числа 0, 1, а правую часть условия Стефана (16) умножим на ε^2 (знак „плюс“ соответствует случаю прокаливания, а „минус“ — промерзания). Выбор

числа χ зависит от скорости изменения функции $l_{\text{ch}}(\tau)$ и $\varphi(\tau) - t_3$ в окрестности точки $\tau = 0$. Случай, когда $\chi = 1$, условно назовем задачей с „тонким“ слоем, а когда $\chi = 0$ — с „толстым“ слоем изоляции. Определение „тонкий“ или „толстый“ следует рассматривать как энергетическое, а не геометрическое понятие, характеризующее мощность слоя изоляции. В случае „толстого“ слоя влияние темпа и характера изменения температурных условий на поверхности несущественно оказывается на динамике фронта промерзания (оттаивания) и наоборот, оказывает определяющее влияние в случае „тонкого“ слоя. Слой изоляции считается „тонким“, если определенный параметр задачи будет меньше или одного порядка с величиной $8\lambda_{\text{ch}}^2/\lambda_m Q_\Phi$ [Комаров и др., 1987]. Делая ряд преобразований, перепишем последнее утверждение в виде критериального уравнения:

$$1/Fo = 8(\lambda_{\text{ch}} C_{\text{ch}}/\lambda_m C_m) Ky, \quad (18)$$

где критерий Фурье $Fo = a_{\text{ch}} T/l_{\text{ch}}^2(\tau)$, Ky — безразмерный параметр, равный $Ky = E = C_m \Omega/Q_\Phi T$, здесь $\Omega = \int |t_3 - \varphi(\tau)| dt$ — охлаждающий импульс (морозоградусосасы).

Параметр E является аналогом „малого параметра“, записанным для случая, когда температура на поверхности — произвольная функция времени, и он может рассматриваться как специфический критерий. Этот критерий предлагается назвать в честь известного мерзлотоведа В. А. Кудрявцева (предлагается впервые). Он характеризует соотношение в годовых теплооборотах количества тепла, идущего на перестройку температурного поля в зонах, к теплу на фазовые переходы и является аналогом критерия Стефана, в том числе для случая периодически установленвшегося режима. Соотношение (18) не связано со спецификой только годовых колебаний температуры и может быть обобщено на случай произвольной частоты колебаний равной $2\pi/T$. Тогда применимость квазистационарного приближения для нахождения динамики температурных полей обусловлена не только требованием о преобладающем влиянии в общем энергетическом балансе, доли тепла идущего на фазовые переходы, но и требованием чтобы время релаксации температурных полей в промерзающей (протаивающей) зоне было несоизмеримо с периодом колебаний температуры на поверхности. Критерий Ky содержит опосредованно в своей структуре все четыре основных классификационных признака типов сезонного промерзания — оттаивания пород В. А. Кудрявцева. Таким образом, согласно (18), выбор расчетных схем для „тонкого“ или „толстого“ слоя обусловлен не только вертикальной протяженностью снежного покрова, но и климатическими

факторами, типом пород и их влажностью, а также в целом, структурой и интенсивностью теплооборотов в слое нулевых годовых амплитуд.

Задача с „тонким“ слоем изоляции. Предполагая, что решение вспомогательной задачи с параметром можно представить в виде степенных рядов:

$$dt(x, \tau, \varepsilon) \sim \sum t_{i,n}(x, \tau) \varepsilon^n, \quad i = 0, 1, 2,$$

$$\xi(\tau) \sim \sum \xi_n(\tau) \varepsilon^n.$$

Подставляя эти ряды в условия задачи и выделяя члены при одинаковых степенях малого параметра, отыскиваем значения коэффициентов рядов. Первый коэффициент находится из решения задачи Коши:

$$\frac{d\xi_1(\tau)}{d\tau} = \frac{\lambda_m |t_3 - t_{\text{дн.п.}}(\tau)|}{Q_\Phi [\xi_1(\tau) + (\lambda_m/\lambda_{\text{ch}}) l_{\text{ch}}(\tau)]}, \quad \xi(0) = 0, \quad (19)$$

которое в квадратурах не выписывается, и задача реализуется численными методами. Однако для простых частных случаев (некоторые из них рассматривались выше) можно привести частные решения задачи. Так при отсутствии изоляции, когда $l_{\text{ch}}(\tau) \equiv 0$, уравнение (19) при интегрировании дает формулу Стефана:

$$\xi_1(\tau) = \left(\frac{2\lambda_m}{Q_\Phi} \int_0^\tau |t_3 - t_n(\tau)| d\tau \right)^{1/2} = (2\lambda_m \Omega/Q_\Phi)^{1/2}.$$

В случае, когда температура дневной поверхности и мощность снежного покрова связаны соотношением $l_{\text{ch}}(\tau) = \beta(\int |t_3 - \varphi(\tau)| dt)^{1/2}$, и если $\varphi(\tau) = \text{const}$, т. е. температура дневной поверхности принимается постоянной (среднеинтегральной за период промерзания), то имеем параболический закон изменения мощности покрова $l_{\text{ch}}(\tau) = \gamma(|t_3 - \varphi| \tau)^{1/2}$. Непосредственной проверкой можно убедиться, что решение задачи (19), удовлетворяющее условию $\xi \geq 0$, имеет вид: $\xi_1(\tau) = \beta(\int |t_\Phi - \varphi(\tau')| d\tau')^{1/2}$, где β определяется как $\beta = [(\lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}})^2 + (2\lambda_m/Q_\Phi)]^{1/2} - \lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}}$.

Когда мощность снежного покрова принимается осредненной за период промерзания постоянной величиной, то (19) переходит в (12). Для случая, когда $t_{\text{дн.п.}}$ и l_{ch} связаны с временем произвольной параболической зависимостью $\varphi(\tau) = t_3 + M\tau^n$, $n = 0, 1$, $l_{\text{ch}}(\tau) = \gamma\tau^{(n+1)/2}$, тогда первый коэффициент разложения в ряд равен $\xi_1(\tau) = \beta\tau^{(n+1)/2}$, где $\beta = [(\lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}})^2 [M]^{1/(n+1)} + (2\lambda_m/Q_\Phi)]^{1/2} - (\lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}})[M]^{1/(n+1)}]$.

Для случая, когда $t_{\text{дн.п.}}(\tau) = t + A \sin \omega\tau$, $l_{\text{ch}}(\tau) = \beta \sin(\omega\tau/2)$, тогда $\xi_1(\tau) = D \sin(\omega\tau/2)$, где D определяется из уравнения:

$$\beta = [(\lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}})^2 (\omega/2A)] +$$

$$+ (2\lambda_m/Q_\Phi)^{1/2} - (\lambda_m \gamma/2\lambda_{\text{ch}})[(\omega/2A)]^{1/2}.$$

Задача Стефана с „толстым“ слоем изоляции. Положим параметр χ в условиях (14) и (15) равным 0. Решение задачи ищем в виде рядов:

$$t_i(x, \tau, \varepsilon) \sim \sum t_{i,n}(x, \tau) \varepsilon^{2n} \text{ и } \xi(\tau, \varepsilon) \sim \sum \xi_n(\tau) \varepsilon^{2n}.$$

Подставляя ряды в условия задачи и выделяя коэффициенты при одинаковых степенях ε , получаем систему уравнений для нахождения последующих коэффициентов разложения [Комаров и др., 1987]. Полученные выражения для них в явном виде не записываются, а реализуются численными методами. Следует отметить, что для этого спектра задач их нулевое приближение значительно хуже согласуется с моделью снежного покрова как термического сопротивления в силу малой чувствительности динамики фронта к закономерностям снегонакопления и другим факторам, влияющим на интенсивность протекания процесса.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что ряд известных в геокриологии аналитических соотношений, полученных Стефаном, Лейбензоном, Крыловым, Лукьяновым и Головко, Фельдманом могут быть получены, как частный случай из более общего решения методом малого параметра, позволяя оценить пределы применимости, порядок погрешности и уточнить физические предпосылки используемых моделей. Последнее касается и ряда формул, полученных с помощью квазистационарного приближения Балобаевым, Войтковским, Павловым.

2. Используя введенный малый параметр, выявлены предельные случаи, когда приближенная формула Кудрявцева, применительно к случаю отсутствия температурной сдвигки, упрощается, в частности, сводится к формуле типа Лейбензона; другой случай реализуется, когда величины амплитуды и среднегодовой температуры близки.

3. В рамках единого асимптотического разложения решить задачу с произвольным видом функции снегонакопления во времени не удается и требуется определенная дифференциация за-

дачи. Найдены условия предельного перехода от одного типа асимптотического разложения к другому, которые количественно выражаются с помощью нового критерия. Его предлагается назвать в честь известного мерзлотоведа В. А. Кудрявцева, характеризующего соотношение в годовых теплооборотах доли идущей на перестройку температурного поля в зонах к доле идущей на фазовые переходы. Критерий содержит опосредованно в своей структуре все четыре основные признака соответствующей классификации типов сезонного промерзания-оттаивания.

Литература

- Балобаев В. Т. Расчет глубины протаивания с учетом внешнего теплообмена // Сезонное протаивание и промерзание грунтов на территории Северо-Востока СССР. М., Наука, 1966, с. 47–57.
- Войтковский К. Ф. Расчет сооружений из льда и снега. М., Изд-во АН СССР, 1954, 136 с.
- Вотякова И. Н. Сравнительная оценка формул для расчета глубины сезонного промерзания-протаивания грунта // Экспериментальные исследования процессов теплообмена в мерзлых горных породах. М., Наука, 1972.
- Гречицев С. Е., Частотинов Л. В., Шур Ю. Л. Криогенные физико-химические процессы и их прогноз. М., Недра, 1980, 383 с.
- Козбода Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М., Наука, 1957, 228 с.
- Комаров И. А., Типенко Г. С. Решение методом малого параметра одномерной задачи Стефана с фиксированным числом фронтов // Всес. конф. по аналитическим методам расчета процессов тепло- и массопереноса. Душанбе, 1986. 250 с.
- Комаров И. А., Типенко Г. С. О приближенном решении задачи промерзания-оттаивания горных пород при наличии на поверхности слоя изоляции // Геокриологические исследования. М., Изд-во МГУ, 1987, с. 260–280.
- Лукьянов В. С., Головко М. Д. Расчет глубины промерзания грунтов. М., Трансжелдориздат, 1957, 164 с.
- Основы геокриологии. Ч. 1. М., Изд-во АН СССР, 1959, 460 с.
- Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях / Ред. В. А. Кудрявцев. М., Изд-во МГУ, 1974, 432 с.
- Павлов А. В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, ЯКИ, 1975, 302 с.
- Фельдман Г. М. Прогноз температурного режима грунтов и развития криогенных процессов. М., Недра, 1977, 254 с.

Поступила в редакцию
21 января 1997 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 12—19

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.791: 569(57)+550.93

ВОЗРАСТ И РАССЕЛЕНИЕ „МАМОНТОВОЙ“
ФАУНЫ АЗИАТСКОГО ЗАПОЛЯРЬЯ
(по радиоуглеродным данным)

Л.Д. Сулержицкий, Ф.А. Романенко*

Геологический институт РАН, 109017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

* Московский государственный университет, географический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

Пополнившаяся коллекция радиоуглеродных дат по костям млекопитающих позволила построить гистограммы (с шагом 1 тыс. лет, всего 262 даты) по некоторым зверям „мамонтовой“ фауны для азиатского Заполярья. Распределение дат на гистограммах позволяет говорить о перемещении ареалов животных за последние 50 тыс. лет на территории континента и о-вов Северного Ледовитого океана.

„Мамонтовая“ фауна, остатки зверей, радиоуглеродное датирование, история расселения

L.D. Sulerzhitsky, F.A. Romanenko*

AGE AND DISTRIBUTION OF THE „MAMMOTH“ FAUNA OF THE POLAR REGION OF ASIA
(radiocarbon dating results)

Geological Institute of RAS, 109017, Moscow, Pyzhevsky per., 7, Russia

* Moscow State University, Department of Geography, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

The enlarged collection of the radiocarbon dates on the mammal bones allowed us to construct histograms (with one thousand year interval) based on 262 dates on various animals of the „mammoth“ fauna from the Asiatic Polar region. The date distribution indicates a shift of the biological habitat of animals during the last 50 ka on the continental and islandic areas of the Arctic basin.

„Mammoth“ fauna, animal remnants, radiocarbon dating, history of settling

Данное сообщение продолжает серию публикаций [Лавров и др., 1992; Сулержицкий, 1995] на одну из наиболее интересных тем геохронологии четвертичного периода — возраст, расселение и динамика ареалов млекопитающих так называемой „мамонтовой фауны“ или „мамонтового комплекса“. К нему относятся мамонты (*Mammuthus primigenius*), шерстистые носороги (*Coelodonta antiquitatis*), бизоны (*Bison priscus*), овцебыки (*Ovibos moschatus*), лошади (*Equus caballus*), а также северные олени (*Rangifer tarandus*). В данной статье вновь рассматриваются радиоуглеродные датировки костных остатков мамонтов из Заполярья, собранные прежде [Сулержицкий, 1995], не публиковавшиеся ранее даты ГИН по другим зверям (98 дат), накопившиеся в лаборатории за последние тридцать лет (Приложение 1), а также серия

датировок (51 дата) костей животных, найденных в 1994 г. участниками Российско-Шведской экспедиции „Экология тундры-94“ на островах и побережьях Северного Ледовитого океана и собранных Ф.А.Романенко (Приложение 2). Определения остеологического материала были выполнены Э.А.Вангенгейм (ГИН РАН). Применился вариант солянокислой методики выделения из кости углерода для датирования, описанный ранее [Лавров и др., 1992] и сцинтилляционный метод счета радиоактивности углерода. Все даты приводятся по константе У. Либби. В настоящее время мы располагаем 175 датировками костей мамонтов и 98 датировками костей других животных (26 — бизона, 30 — лошади, 20 — носорога, 11 — овцебыков, 7 — северного оленя, 3 — лося и 1 — благородного оленя), обнаруженных в азиатском Заполярье. На об-

суждаемой территории условной границей принят Северный полярный круг (в виде исключения учтено несколько дат Магаданской области). Из перечисленных животных далее не рассматриваются северный олень, лось и благородный олень ввиду малочисленности дат по ним. Таким образом, в настоящем сообщении рассматривается массив из 262 радиоуглеродных дат. Массив голоценовых дат о. Врангеля детально не рассматривается, так как полностью он еще не опубликован, а учитываются только его хронологические границы.

Прежде чем переходить к анализу построенных по результатам датирования гистограмм, кратко сформулируем основные положения предыдущих публикаций. Ископаемые кости, по нашему представлению, — наиболее надежный материал для получения радиоуглеродных дат, несущий информацию о времени существования животного, виде и месте его гибели. Геоморфологическое положение точек находок и сохранность костей позволяют в большинстве случаев исключить возможность их дальнего переноса, в то время как при жизни животные могли передвигаться по большой площади. Мерзлота способствовала хорошей сохранности коллагена. Кости, видимо, не поражаются прокариотными бактериями, вносящими загрязнения в другие материалы. Найденные остатки — незначительная часть огромного количества погибших животных, поэтому вероятность попадания в коллекцию фрагментов животных, оказавшихся за пределами своего обычного ареала, крайне невелика. Точность датирования большей частью характеризуется приведенными доверительными интервалами и определяет время, когда жили животные. Соответственно, хронологические построения по ним вполне допустимы. Для мамонтов, количество костных остатков которых обычно больше, чем иных видов, можно предполагать высокую экологическую пластичность и вероятность существования популяций с различной тактикой перемещения — как оседлых, так и имеющих дальние сезонные миграции. Видимо, ареалы различных популяций могли быть весьма специфичными. Миграционные пути в значительной мере, вероятно, были обусловлены распределением на территории пищевых ресурсов, и отчасти предполагаемой возможностью повышения плодородия тундровых пастбищ при систематическом выпасе [Зимов и др., 1991]. Можно допустить и возможность антропогенного воздействия в отдельных районах.

Северная Евразия в целом, видимо, была длительное время относительно равномерно заселена животными „мамонтового комплекса“, и тафономические условия на всей ее территории были схожими, поэтому на гистограммах (рис. 1) даты относительно равномерно заполняют весь период от 53 (и более) до 9,5 тыс. лет назад.

Сравнительно небольшое количество запредельных датировок, встречающихся во многих районах, объясняется, в частности, отсутствием костей более древних животных. Причиной их отсутствия вряд ли могли быть неблагоприятные тафономические условия. Видимая причина — отсутствие тогда самих животных в некоторых районах Заполярья, вернее отсутствие соответствующих континентальных отложений казанцевского времени. Во всяком случае, на Таймыре тогда была грандиозная морская трансгрессия [Сулержицкий и др., 1997], закончившаяся незадолго до начала работы радиоуглеродного хронометра. Из заведомо более древних отложений (например, олерских) кости для датирования не брались, хотя углерод органической составляющей в них присутствует в количестве, достаточном для изучения ^{14}C .

Через рубеж 10 тыс. лет назад перевалили только три даты по мамонтам на Таймыре, массив дат по локальной популяции мамонтов на о. Врангеля и отдельные даты второй половины голоцена по овцебыкам и одной лошади с Таймыра. Малое число голоценовых дат, видимо, объясняется отсутствием самих крупных фитофагов или их значительных популяций на огромных просторах Севера. Причиной тому в высоких широтах, видимо, было начавшееся еще до 10 тыс. лет назад сильное потепление, приведшее к катастрофическому таянию льдистых толщ, частичной гибели растительных покровов, смене растительных сообществ безлесных просторов, продвижению с юга лесов.

Для историко-палеогеографической интерпретации радиоуглеродных дат по костям крупных млекопитающих чрезвычайно важен тафономический фактор. Может ли он принципиально изменить вероятность сохранения остатков одних животных относительно других или на порядки изменить число сохраняющихся остатков на некоторых временных рубежах? Представляется, что последнее маловероятно. Равно как не происходит дискриминации в тафономических процессах одних животных по отношению к другим (исключая, возможно, северного оленя, кости которого чрезвычайно быстро разрушаются). Благодаря спонтанной подборке нашего материала, когда брались все даты по костям, поступающим из всевозможных источников, и отбрасывались только повторные определения по одному или группе одновременно погибших животных, видимо, достигается удовлетворительная представительность данных для их рассмотрения по крупным регионам.

Достоверность построений несомненна для отрезков времени, в которых имеются даты, т.е. жили звери. Для временных интервалов, в которых дат нет, отсутствие зверей будет достоверно лишь при больших или достаточно длительных перепадах количества дат во времени. В отобра-

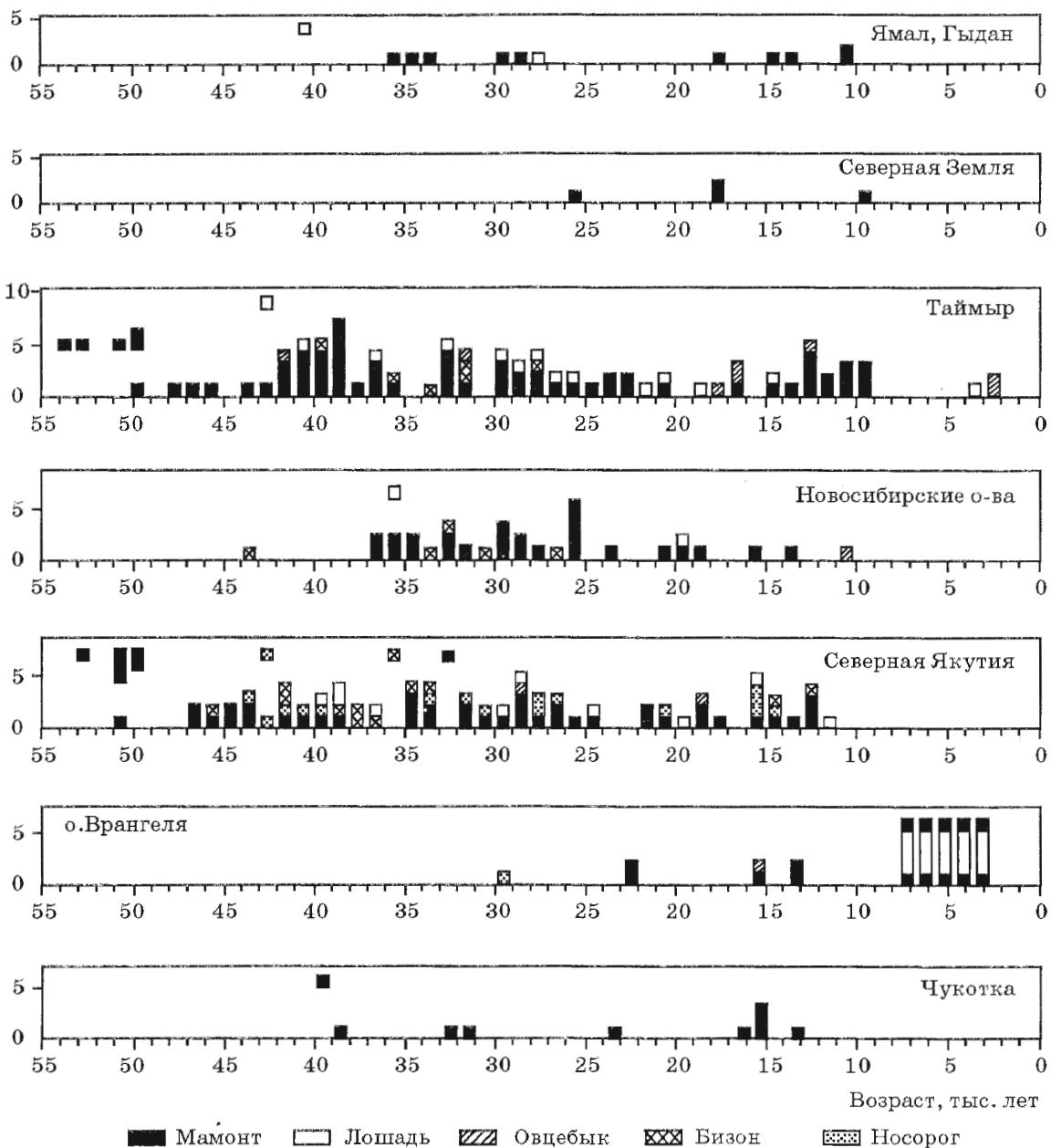


Рис. 1. Радиоуглеродный возраст различных зверей.

„Парящие“ квадраты — „запредельные“ даты, то есть те, которые больше указанных значений. Шаг шкалы — одна тыс. лет.

женной на гистограммах коллекции дат, видимо, имеется достаточно аномалий распределения их количества во времени, что позволяет говорить о распределении животных во времени и пространстве. Последовательно рассмотрим распределение дат костей различных животных по регионам (рис. 2). Имеющиеся даты (10) по Ямалу и Гыдану позволяют допустить, что сюда мамонты пришли 35 тыс. лет назад и дожили, как и на Таймыре, до начала голоцен. Распределение дат похоже на таймырское, но почти обратное ма-

личесленным датам (4) Северной Земли. Последние, видимо, указывают на то, что здесь отсутствовал сплошной ледниковый покров в сартанско время. Наибольшее число дат (97) с Таймыра. Из них 70 по мамонтам, которые здесь, видимо, обитали с окончания казанцевской трансгрессии (65 тыс. лет назад) до начала голоцена (9670 лет), это последние на континенте мамонты. Интересно, что здесь находок остатков лошадей в плеистоцене моложе 14 тыс. лет назад нет, а находок носорогов нет вообще. Видимо, и овце-

ВОЗРАСТ И РАССЕЛЕНИЕ „МАМОНТОВОЙ“ ФАУНЫ

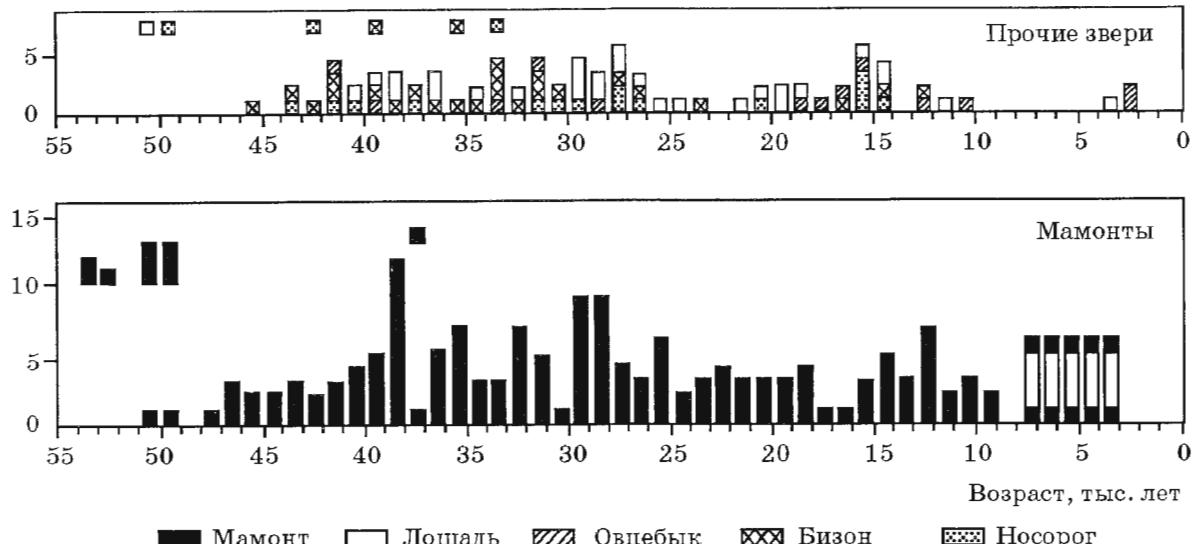


Рис. 2. Распределение радиоуглеродных дат различных зверей по регионам.

„Парящие“ квадраты — „запредельные“ даты, то есть те, которые больше указанных значений.

быки не были постоянными жителями Таймыра, в частности, дат нет от 12 тыс. лет назад до второй половины голоцен. Многочисленные даты мамонтов 40—38 тыс. лет назад и немногие — 21—15 тыс. лет назад противостоят в некоторой мере таковым в более южных регионах, что, возможно, указывает на перераспределение плотности заселения животными территорий.

Дат по Новосибирским о-вам (всего 37, 25 — мамонты), видимо, достаточно для заключения, что по каким-то причинам мамонты на территории островов ранее 36 тыс. лет назад не появлялись, хотя по существующим представлениям шельф был открыт. На последнее также указывает одна из пяти дат по бизонам — 43 тыс. лет назад. Единственная здесь дата овцебыков (самая поздняя из всех имеющихся плейстоценовых — 10 тыс. лет назад). На всех островных территориях пока отсутствуют достаточно древние и „запредельные“ даты.

Гистограмма Северной Якутии, являющейся наиболее обширной и разнообразной по природным условиям из рассматриваемых территорий, представляет 90 дат, 46 из которых по остаткам мамонтов, в том числе пять „запредельных“. Остальные звери (44) тоже дали четыре „запредельные“ даты. Это отчасти указывает на то, что в отличие от островов, территории которых, возможно, не посещались мамонтами (и их спутниками) в начале рассматриваемого времени, на континенте представители „мамонтовой“ фауны жили и до того. На о. Врангеля из всех имеющихся дат по носорогу получена самая древняя (29 тыс. лет назад). На этом острове пока нет дат по мамонтам старше 23 тыс. лет назад, хотя общее их число превышает 50. Наибольшая часть

дат голоценовая, от 4 до 8 тыс. лет назад, все они принадлежат полукарликовой форме мамонта [Аверьянов и др., 1995]. По нашим представлениям, отсутствие дат от 12 до 8 тыс. лет назад указывает, что здесь в то время мамонтов не было.

Для того, чтобы среди датированных костей мамонтов не попали 12—8 тысячелетние, численность животных на обособившемся острове в это время должна была быть на 2 порядка ниже 8—4 тысячелетних, что много ниже критической численности популяции, при которой она погибла бы еще до голоцена. Тафономические условия, видимо, принципиально не менялись. Плейстоценовые мамонты здесь — животные обычного размера, вероятно, заходившие во время миграций на остров, когда последний был еще частью осущенного шельфа. Голоценовые мамонты могли попасть на уже обособившийся остров с едомного, островного же рефугиума, вытолкнувшего аборигенных жителей на близлежащий о. Врангеля при своем исчезновении.

Гистограмма Чукотки, материала по которой пока мало (10), судя по раскладу дат, будет заполняться по всей шкале, как на Таймыре, так и в Северной Якутии.

В целом мамонтовая фауна относительно равномерно (см. рис. 1) заселяла просторы Севера Азии, перераспределяясь по отдаленным территориям и давая некоторые флюктуации численности своих компонентов. Уверенная интерпретация этих флюктуаций требует привлечения дополнительной разносторонней информации и, главное, расширения массивов радиоуглеродных дат. В перспективе такая работа может стать важным методом детального восстановления палеогеографических условий.

Л.Д. СУЛЕРЖИЦКИЙ, Ф.А. РОМАНЕНКО

Приложение 1.

Список радиоуглеродных датировок остатков ископаемых животных

№ п/п	Дата	Лабораторный номер	Местонахождение	Зверь
1	2 700±70	ГИН-3803	среднее течение р. Логата	овцебык
2	2 920±50	ГИН-2945	мыс Челюскина	овцебык
3	3 250±60	ГИН-3243	р. Агапа	лошадь
4	5 090±80	ГИН-3132	р. Большая Балахня	олень
5	7 990±70	ГИН-293	Западный Ямал	олень
6	9 550±80	ГИН-4328	о. Фаддеевский	олень
7	10 750±90	ЛУ-1666	о. Котельный	овцебык
8	11 660±450	ГИН-6427	р. Оленек	лошадь
9	12 150±40	ГИН-3131	р. Большая Балахня	овцебык
10	12 800±60	ГИН-4038	р. Кеременсит (бассейн Индигирки)	бизон
11	14 100±160	ГИН-3823а	среднее течение р. Логата	лошадь
12	14 260±150	ГИН-6007	Юкагирское плоскогорье	носорог
13	14 560±250	ГИН-6096	р. Оленек, 400 км выше устья	лошадь
14	14 800±250	ГИН-3208а	р. Колыма	бизон
15	15 130±50	ГИН-6023	р. Бол. Хомус-Юрях	носорог
16	15 130±90	ГИН-6024	р. Бол. Хомус-Юрях	носорог
17	15 250±60	ГИН-8248	о. Врангеля	овцебык
18	15 300±60	ГИН-5371	устье р. Омолон	лошадь
19	15 850±80	ГИН-6020	р. Индигирка	носорог
20	16 080±100	ГИН-3239	р. Агапа	овцебык
21	16 390±120	ГИН-5727	бухта Кожевникова	бизон
22	17 800±160	ГИН-3140в	оз. Таймыр, мыс Саблера	овцебык
23	18 200±300	ГИН-6102	р. Оленек, 400 км выше устья	овцебык
24	18 300±200	ГИН-3140б	р. Бол. Балахня	лошадь
25	19 100±120	ГИН-8252	о. Котельный	лошадь
26	19 480±100	ГИН-3868	р. Колыма, Дуванный Яр	лошадь
27	20 000±1300	ГИН-7696	р. Колыма, Дуванный Яр	олень
28	20 400±200	ГИН-6021	р. Хрома	носорог
29	20 500±400	ГИН-4327	о. Фаддеевский	олень
30	20 700±500	ГИН-3142а	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
31	21 500±200	ГИН-2744	Таймыр, р. Бедербо-Тарида	лошадь
32	23 590±1560	ГИН-8251	Западная Чукотка	бизон
33	24 000±400	ГИН-6426	р. Оленек, 400 км выше устья	лошадь
34	25 200±200	ГИН-1817а	оз. Энгельгардт, Таймыр	лошадь
35	25 500±150	ГИН-6014а	р. Бол. Анюй	бл. олень
36	26 100±300	ГИН-4329	о. Фаддеевский	бизон
37	26 400±300	ГИН-3142б	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
38	26 900±400	ГИН-6005	р. Колыма	носорог
39	27 300±300	ГИН-3209	р. Мал. Анюй	носорог
40	27 300±300	ГИН-6018	р. Мал. Анюй	носорог
41	27 360±170	ГИН-6448а	Ямал, р. Щучья	лошадь
42	27 600±400	ГИН-3814	р. Логата	бизон
43	27 900±300	ГИН-3841б	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
44	28 180±270	ГИН-8219	Анабаро-Оленекское междуречье	лошадь
45	28 300±400	ГИН-5732	бухта Кожевникова	лошадь
46	28 600±500	ГИН-3858	р. Колыма, Дуванный Яр	овцебык
47	29 100±400	ГИН-4330	о. Фаддеевский	лошадь
48	29 700±700	ГИН-3141а	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
49	29 800±340	ГИН-8259а	о. Врангеля	носорог
50	29 800±1200	ГИН-5047	р. Павел-Сайынги-Юрях (бассейн притока р. Оленек)	лошадь

ВОЗРАСТ И РАССЕЛЕНИЕ „МАМОНТОВОЙ“ ФАУНЫ

Окончание прил. 1

№ п/п	Дата	Лабораторный номер	Местонахождение	Зверь
51	30 500±400	ГИН-8222	о. Бельковский	бизон
52	30 900±200	ГИН-6022	р. Бол. Хомус-Юрях	носорог
53	30 900±300	ГИН-3121/1	р. Большая Балахня	лось
54	31 500±300	ГИН-6013	р. Омолов	носорог
55	31 500±600	ГИН-3012	р. Хатанга	овцебык
56	31 800±500	ГИН-3825	р. Логата	бизон
57	31 900±500	ГИН-3241	р. Агапа	бизон
58	32 000±500	ГИН-6475	р. Колыма	олень
59	32 000±1000	ГИН-3141в	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
60	>32 000	ГИН-6017	р. Аччыгай-Алайха, бассейн Индигирки	носорог
61	32 200±600	ГИН-8228	о. Фаддеевский	бизон
62	33 100±320	ГИН-8231	о. Фаддеевский	бизон
63	33 100±400	ГИН-6010	р. Колыма	носорог
64	33 750±1200	ГИН-3824	ср. течение р. Логата	бизон
65	33 800±1200	ГИН-8235	п-ов Лопатка	бизон
66	34 600±1200	ГИН-3141в	оз. Таймыр, мыс Саблера	лошадь
67	34 700±400	ГИН-4434	р. Колыма, Дуванный Яр	бизон
68	>35 300	ГИН-7308	р. Малый Анюй	бизон
69	35 800±800	ГИН-3100/1	Таймыр, р. Бедербо-Тарида	бизон
70	36 300±640	ГИН-8221	Анабаро-Оленекское междуречье	лошадь
71	36 300±900	ГИН-3119	р. Бол. Балахня	лошадь
72	36 800±500	ГИН-6097	р. Оленек, 400 км выше устья	бизон
73	37 000	ГИН-3100/П	Таймыр, р. Бедербо-Тарида	лось
74	37 100±500	ГИН-3207	р. Колыма	бизон
75	37 700±1100	ГИН-6009	р. Бол. Чукочья	носорог
76	38 100±800	ГИН-6430	р. Оленек	лошадь
77	38 400±800	ГИН-5711	р. Колыма	бизон
78	38 700±1000	ГИН-4965	хр. Кулар	лошадь
79	>39 000	ГИН-8239	Зап. Чукотка	бизон
80	39 200±800	ГИН-2764а	р. Бол. Балахня	бизон
81	39 600±500	ГИН-3519	север Анабаро-Оленекского междуречья	лошадь
82	39 900±500	ГИН-6011	р. Берелех	носорог
83	40 000±500	ГИН-6012	верховья р. Яна	носорог
84	>40 000	ГИН-8544	Зап. Ямал	лошадь
85	40 200±1200	ГИН-3823	ср. течение р. Логата	лошадь
86	41 300±800	ГИН-6098	р. Оленек, 400 км выше устья	бизон
87	41 600±800	ГИН-6006	р. Колыма	носорог
88	41 700±1500	ГИН-6428	р. Оленек	бизон
89	41 800±900	ГИН-3120/1	р. Бол. Балахня	лось
90	41 900±600	ГИН-2327	Таймыр, р. Сида	овцебык
91	>42 300	ГИН-6015	р. Колыма	носорог
92	42 800±700	ГИН-5710	р. Колыма	бизон
93	43 400±2200	ГИН-8253	о. Котельный	бизон
94	43 700±1000	ГИН-6008	р. Бол. Чукочья	носорог
95	45 400±1200	ГИН-3860	р. Колыма, Дуванный Яр	бизон
96	>48 700	ЛУ-1673	о. Котельный	олень
97	>49 000	ГИН-6014	р. Бол. Анюй	носорог
98	>50 000	ГИН-3866	р. Колыма, Дуванный Яр	лошадь

Приложение 2.

Список радиоуглеродных датировок остатков ископаемых животных
(собранные Российско-Шведской экспедицией, 1994 год)

№ п/п	Дата	Лабораторный номер	Местонахождение	Материал	Зверь
1	4 370±70	ГИН-8249	о. Врангеля	кость	мамонт
2	9 780±40	ГИН-8256	северо-восточное побережье Таймыра	бивень	мамонт
3	12 950±130	ГИН-8241	о. Айон	кость	мамонт
4	13 650±170	ГИН-8427	о. Шокальского	кость	мамонт
5	13 700±100	ГИН-8230	о. Котельный	кость	мамонт
6	14 000±120	ГИН-8242	о. Айон	зуб	мамонт
7	14 120±170	ГИН-8241а	о. Айон	бивень	мамонт
8	15 000±70	ГИН-8255	п-ов Широкостан	кость	мамонт
9	15 250±60	ГИН-8248	о. Врангеля	кость	овцебык
10	15 400±100	ГИН-8258	о. Врангеля	кость	мамонт
11	18 500±120	ГИН-8229	о. Фаддеевский	кость	мамонт
12	19 100±120	ГИН-8252	о. Котельный	кость	лошадь
13	20 100±150	ГИН-8263	п-ов Широкостан	бивень	мамонт
14	22 400±200	ГИН-8257	о. Врангеля	кость	мамонт
15	22 400±300	ГИН-8259	о. Врангеля	кость	мамонт
16	23 590±1560	ГИН-8251	Зап. Чукотка	кость	бизон
17	23 940±150	ГИН-8244	о. Фаддеевский	бивень	мамонт
18	25 180±150	ГИН-8227	о. Фаддеевский	бивень	мамонт
19	25 200±180	ГИН-8246	о. Фаддеевский	кость	мамонт
20	25 540±170	ГИН-8532	о. Фаддеевский	кость	мамонт
21	26 680±200	ГИН-8237	п-ов Лопатка	бивень	мамонт
22	27 100±300	ГИН-8224	о. Фаддеевский	кость	мамонт
23	28 180±270	ГИН-8219	Анабаро-Оленекское междуречье	кость	лошадь
24	28 300±350	ГИН-8545	Западный Ямал	кость	мамонт
25	28 400±340	ГИН-8220	п-ов Терпяй-Тумус, Оленекский залив	кость	мамонт
26	28 650±350	ГИН-8225	о. Фаддеевский	кость	мамонт
27	28 680±200	ГИН-8237	п-ов Лопатка	кость	мамонт
28	29 700±250	ГИН-8260	о. Фаддеевский	кость	мамонт
29	29 800±340	ГИН-8259а	о. Врангеля	кость	носорог
30	29 900±300	ГИН-8236	п-ов Лопатка	бивень	мамонт
31	30 000±300	ГИН-8218	п-ов Терпяй-Тумус, Оленекский залив	кость	мамонт
32	30 500±400	ГИН-8222	о. Бельковский	кость	бизон
33	31 400±300	ГИН-8226	о. Фаддеевский	бивень	мамонт
34	31 530±420	ГИН-8240	низовья р. Кэйнгувеем (Западная Чукотка)	бивень	мамонт
35	32 200±600	ГИН-8228	о. Фаддеевский	кость	бизон
36	32 600±700	ГИН-8261	о. Фарватерный, Пясина	кость	мамонт
37	33 100±320	ГИН-8231	о. Фаддеевский	кость	бизон
38	33 600±500	ГИН-8233	п-ов Лопатка	кость	мамонт
39	33 800±1200	ГИН-8235	п-ов Лопатка	кость	бизон
40	34 400±400	ГИН-8254	о. Котельный	кость	мамонт
41	34 500±500	ГИН-8247	о. Фаддеевский	кость	мамонт
42	35 210±500	ГИН-8243	о. Фаддеевский	бивень	мамонт
43	35 800±700	ГИН-8223	о. Бельковский	кость	мамонт
44	35 900±500	ГИН-8262	Анабаро-Оленекское междуречье	кость	мамонт
45	36 000±500	ГИН-8238	о. Фаддеевский	кость	мамонт
46	36 300±640	ГИН-8221	Анабаро-Оленекское междуречье	кость	лошадь
47	36 700±500	ГИН-8243а	о. Фаддеевский	бивень	мамонт
48	38 500±900	ГИН-8250	низовья р. Кэйнгувеем (Западная Чукотка)	кость	мамонт
49	>39 000	ГИН-8239	Западная Чукотка	череп	бизон
50	>40 000	ГИН-8544	Западный Ямал	кость	лошадь
51	43 400±2200	ГИН-8253	о. Котельный	кость	бизон

ВОЗРАСТ И РАССЕЛЕНИЕ „МАМОНТОВОЙ“ ФАУНЫ

Литература

- Аверьянов А.О., Вартанян С.Л., Гарутт В.Е. Мелкий мамонт, *Mammuthus primigenius vrangeliensis* Garut, Averianov et Vartanian, 1993 с о. Врангеля (Северо-Восточная Сибирь) // Исследования по плейстоценовым и современным млекопитающим. Тр. Зоологического института РАН, 1995, т. 263, с. 184—199.
- Зимов С.А., Чупрынин В.И. Экосистемы: устойчивость, конкуренция, целенаправленное преобразование. М.: 1991, 160 с.
- Лавров А.А., Сулержицкий Л.Д. Мамонты: радиоуглеродные данные о времени существования // Вековая динамика биотооценозов. М.: 1992, с. 36—52.

Сулержицкий Л.Д. Черты радиоуглеродной хронологии мамонтов (*Mammuthus primigenius*) Сибири и севера Восточной Европы // Исследования по плейстоценовым и современным млекопитающим. Тр. Зоологического института РАН, 1995, т. 263, с. 163—183.

Сулержицкий Л.Д., Арсланов Х.А., Герасимова С.А. и др. Уровни и возраст казанцевской морской трансгрессии на Восточном Таймыре // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, с. 39—44.

*Поступила в редакцию
8 июля 1997 г.*

РЕЛИКТ ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА БЫВШЕМ НУНАТАКЕ ПЛАТО МАУНТИН (Юго-Западная Альберта)

С. А. Харрис

Географический ф-т Университета Калгари, T2N 1N4, Альберта, Калгари, Канада

На Плато Маунтин, расположенном на юго-западе штата Альберта (Канада), наблюдается реликтовая альпийская мерзлота, оставшаяся от эпохи Поздневискоинского оледенения. Плоская вершина горы не подвергалась оледенению в течение плейстоцена и реликтовая мерзлота здесь не соответствует современному климату. Вблизи поверхности температура пород понижается и тепло медленно проникает в породы. Тепло передается как посредством кондуктивного теплообмена, так и движением подземных вод, но при этом поступление тепла частично компенсируется охлаждающим влиянием потоков воздуха, проникающих между обломками и в трещины в коренных породах. Потоки подземных вод и воздуха оказывают существенное по величине, но локальное воздействие на температуру пород, и место этого воздействия может изменяться во времени.

Поверхность представлена структурными грунтами и термокарстовыми формами в стадии консервации, образовавшимися при вытачивании жильных льдов, которые сформировались при более холодном климате под каменными кольцами. На северной оконечности горы существует ледяная пещера, которая сохранилась в кровле многолетнемерзлых пород. Альпийская растительность включает отдельные виды флоры Арктики, а также флоры побережья США к югу от Калифорнии. Распространение специфических видов объясняется миграцией альпийской флоры во время прошлых холодных эпох. Наблюдаются также некоторые местные особенности.

Поздневискоинское оледенение, реликтовая альпийская мерзлота, структурные грунты, альпийская растительность

A RELICT OF LATE QUATERNARY PERMAFROST ON A FORMER NUNATAK AT PLATEAU MOUNTAIN (SW Alberta)

S. A. Harris

Department of Geography, University of Calgary, T2N 1N4, Alberta, Calgary, Canada

On Plateau Mountain in southwest Alberta is an example of relict alpine permafrost left from the Late Wisconsin glaciation. The flat mountain top was not glaciated during the Pleistocene and the relict permafrost on its summit is not yet in equilibrium with the present-day climate. The near-surface ground temperature becomes colder with depth and heat is moving slowly into the ground. This heat flow is accomplished by heat conduction and groundwater movement, but this is partly counteracted by air moving through block fields or cracks in the bedrock. Ground water and air movement produce large but localized ground temperature effects which may change location over time.

The surface shows inactive sorted patterned ground and thermokarst resulting from melting of ice wedges formed beneath the stony borders during a colder climate. At the north end of the mountain, an ice cave occurs in the surface of the relict permafrost. The alpine vegetation includes disjunct species from the floras of the Arctic and also from the west coast of the contiguous United States south to California. These distributions imply a migration of alpine floras during past cold events. Some local speciation has also occurred.

Late Wisconsin glaciation, relict alpine permafrost, sorted patterned ground, alpine vegetation

ВВЕДЕНИЕ

Реликтовая мерзлота типична для низменных территорий Юкона [Mackay *et al.*, 1972] и Аляски [Pewe, 1966], не подвергшихся оледенению, а также широко распространена в Сибири, но довольно редко встречается в горах, подвергшихся оледенениям. Такое исключение — Плато Маунтин в Скалистых горах, на юго-западе штата Альберта в Канаде. В статье приводятся результаты продолжающихся с

1974 г. наблюдений за температурой воздуха и пород, а также связанных с ними явлений на Плато Маунтин.

Плато Маунтин представляет собой плосковершинную гору с абсолютной высотой 2519 м, расположенную в 80 км к юго-западу от г. Калгари (рис. 1). Это ядро антиклинали, слабо наклоненной к северу и западу. Перекрывающие породы представлены кремнистыми доломитами

РЕЛИКТ ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА БЫВШЕМ НУНАТАКЕ

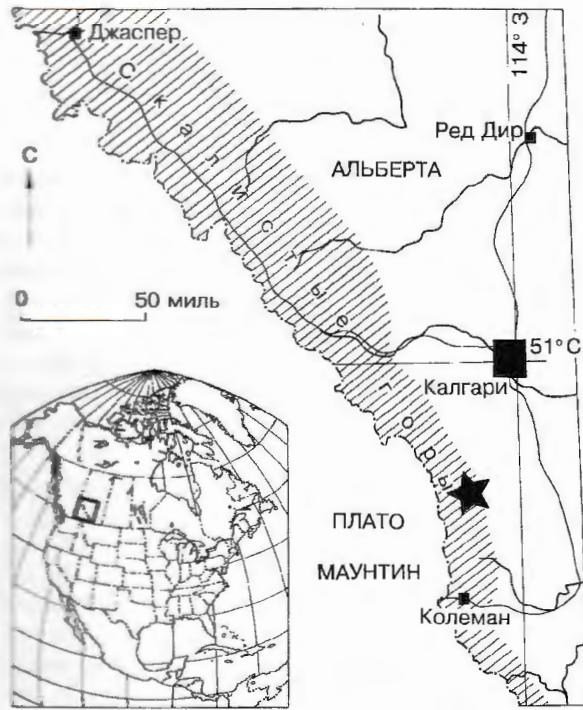


Рис. 1. Плато Маунтин в Юго-Западной Альберте, Канада.

верхнего карбона группы Спрай Лейкс, перекрытыми известняками, доломитами, мягкие песчаники и сланцы Эверингтонской и Маунхедской формации [Douglas, 1958; Norris, 1993a, b]. Площадь вершины составляет 13 км².

Верхняя граница леса сильно изменяется по высоте в зависимости от экспозиции (рис. 2). Ее среднее положение на западном склоне составляет 2290 м [Bryant, Scheinberg, 1970]. Как правило, граница нерезкая и включает криволесья и поляны с ивой и разнотравьем среди деревьев, протягивающаяся вниз от этой высоты до 180 м по вертикали. Выше границы леса, в альпийской зоне преобладают альпийские луга с лишайниками, а на вершине — альпийская тундра с камнями, покрытыми лишайником. В верхней части субальпийского леса преобладают ель Энгельмана и альпийская лиственница, с меньшим количеством белокорой сосны и пихты Дугласа.

Территория расположена на подветренной стороне к востоку от Главного водораздела. Таким образом, вершина горы лежит значительно ниже границы оледенения [Ostrem, 1966] и во время Висконсинского оледенения не покрывалась ледником. Снег от редких снегопадов сдувался с вершины в тыловые части цирков на южном и восточном склонах горы (см. рис. 2).

Средняя годовая температура воздуха на высоте 2500 м за период 1974—1995 гг. составила

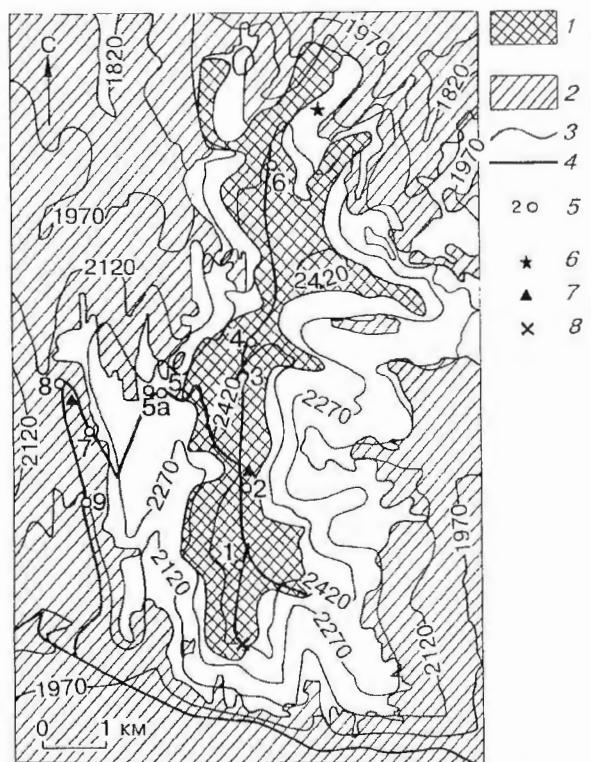


Рис. 2. Расположение участков измерения температуры и положение альпийской зоны на Плато Маунтин (с использованием материалов [Harris, Brown, 1978]).

1 — плато, 2 — лес, 3 — граница леса и плато, 4 — дорога, 5 — скважина и ее номер, 6 — ледяная пещера, 7 — метеостанция, 8 — глубокая термометрическая скважина.

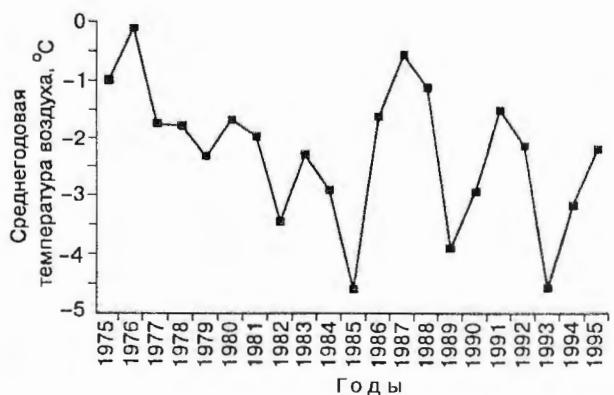


Рис. 3. Изменение среднегодовой температуры воздуха на высоте 2500 м (за период с 1974 по 1995 гг., Плато Маунтин [ПМ № 2])

-2,22 °C, при этом с 1985 г. наблюдались значительные вариации (рис. 3). За период исследований (21 год) произошло понижение температуры примерно на 1,62 °C.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1974 г. было проведено бурение с целью обнаружить многолетнемерзлые породы. В течение следующих 4 лет были пробурены и оборудованы 10 скв. (см. рис. 2), одна из которых имела глубину 150 м [Harris, Brown, 1978; 1982]. Температура воздуха и снежный покров измерялись на 5 площадках начиная с 1994 г., а относительная влажность определялась на высоте 2500 м с 1995 г. Для определения мерзлого или талого состояния пород проводились ежемесячные измерения их температуры, в то время как стационарные наблюдения на ключевых участках обеспечивали контроль за климатическими изменениями и колебаниями температуры пород. Кроме того, измерения температуры были проведены в ледяной пещере на северной оконечности горы [Harris, 1979].

Дополнительные исследования включают изучение распространения растительности [Bryant, Scheinberg, 1970] и происхождения каменных морей и структурных грунтов [Woods, 1977] и эти исследования продолжаются. Гербарий исследуется в Калгари, в то время как детальные исследования происхождения сухих несортированных колец в горах ведутся с использованием нейтронных зондов, температурных кос и системы телескопических мерзлотометров различной длины. При изучении теплообмена в минеральных почвах и в пределах каменных морей используются логгеры. Доктор А. Прик изучает устойчивость коренных пород к физическому выветриванию под действием циклов промерзания-протаивания, а также увлажнения-ис-

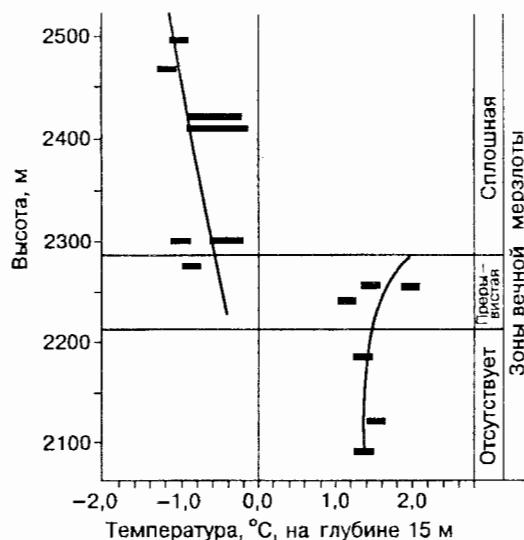


Рис. 4. Изменение температуры пород на глубине 15 м в зависимости от высоты, плато Маунтин.

сушки на аппаратуре С.Н.Р.С. в Каннах и в университетах Льежа и Калгари.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристики многолетнемерзлых пород

Многолетнемерзлые породы в альпийской зоне развиты повсеместно на некоторой глубине. Зимой снег сдувается с вершины и накапливается в прилегающих цирках восточного и южного склонов горы, таким образом отсутствует теплоизолирующее влияние снежного покрова. Средняя мощность снежного покрова составляет 12 см, в отличие от 95 см в лесу. Там, где средняя высота снежного покрова более 50 см, многолетнемерзлые породы отсутствуют (рис. 4, 5). Мощность сезонноталого слоя изменяется от 5 до 15 м (рис. 6) и определяется современным климатом.

В 150-метровой скв. отмечаются три холодных пика температуры на глубинах 9 м, 60 м и 130 м (рис. 7). Однако это не является результатом влияния климатических изменений за последние 120 лет, которые были отмечены на северном склоне хребта Брукса на Аляске [см. Gold, Marshall, 1969; Gold, Lachenbruch, 1973]. Холодные экстремумы на глубине 60 и 130 м возможно являются реликтом похолодания последнего Висконсинского оледенения, так как

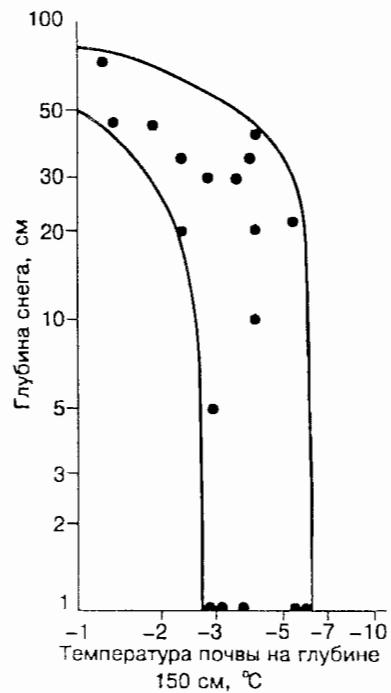


Рис. 5. Зимняя температура почвы на глубине 150 см в зависимости от среднезимней мощности снежного покрова, альпийская зона, Плато Маунтин (с использованием материалов [Harris, Brown, 1978]).

РЕЛИКТ ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА БЫВШЕМ НУНАТАКЕ

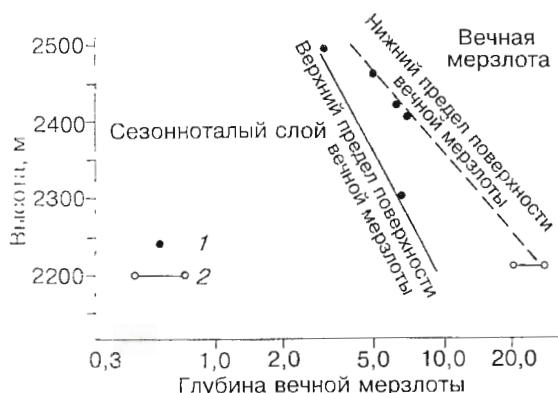


Рис. 6. Зависимость мощности снежного покрова от высоты, Плато Маунтин.

1 — температура грунта, 2 — ледяная пещера.

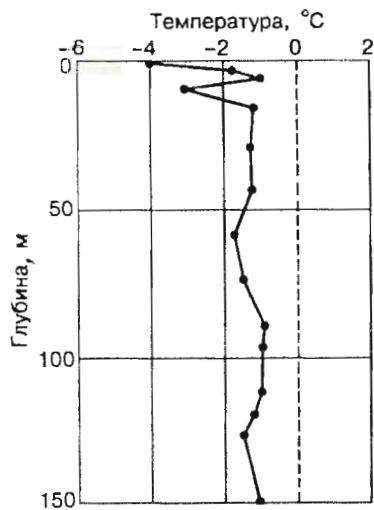


Рис. 7. Температура пород в скважине глубиной 150 м (ПМ № 2А) на Плато Маунтин в 1979 г. [Harris, 1990].

только оледенение позднего Висконсина достигало на западном склоне горы высоты около 2130 м. На восточном и южном склонах существовал только небольшой каровый ледник.

На рис. 8 показана температура пород, измеренная на Плато Маунтин № 2 с помощью термисторов в период с 1976 по 1989 гг. ([Harris, 1990] рис. 2). Температура воздуха и пород на глубине от 0,75 до 6 м оставалась постоянной с незначительными колебаниями, обусловленными поступлением солнечного тепла к поверхности. Вместе с тем температура пород на глубине 9 м понижалась с 1977 до 1982 гг., а затем стала постоянной. Так как в других скважинах геотермальных изменений не наблюдалось сни-

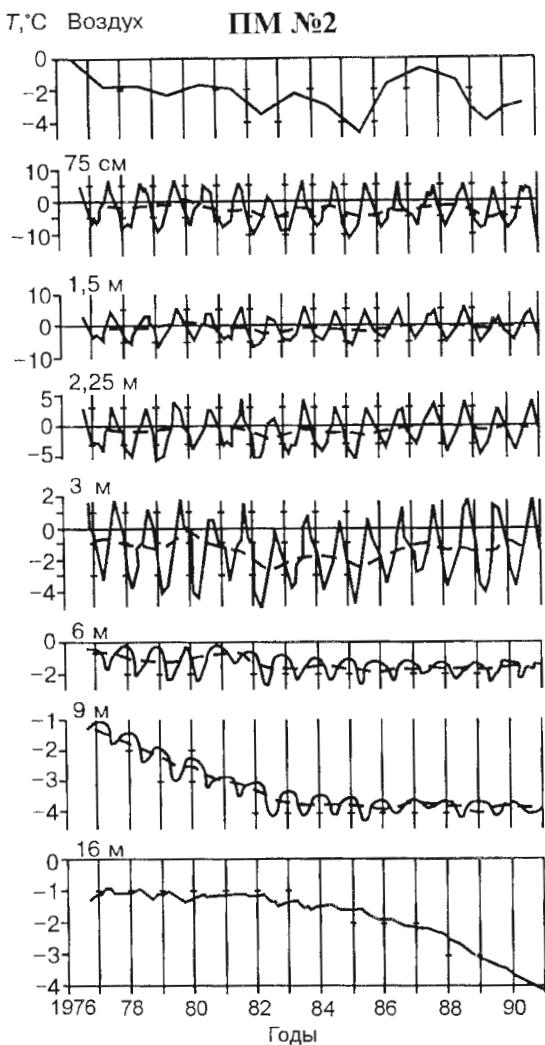


Рис. 8. Температура пород на различных глубинах на Плато Маунтин № 2 рядом с ПМ № 2А за период с 1976 по 1989 гг. и среднегодовая температура воздуха.

Для слаживания кривых использовались скользящие средние за шесть месяцев.

жение температуры на глубине 9 м можно связать с движением воды в породе, которое изменило тепловой баланс. В 1984 термистор на глубине 16 м показал начало подобного снижения температуры, возможно, по той же причине.

На рис. 9 показаны огибающие температурных кривых для Плато Маунтин №1. Замечено, что температура пород фактически уменьшается с глубиной. Это свидетельствует о том, что многолетнемерзлые породы еще находятся в процессе адаптации к более теплому современному климату.

Ледяная пещера Плато Маунтин

Одна из интересных особенностей плато — ледяная пещера, расположенная на северо-восточном склоне горы на высоте 2225 м (см. рис. 2). Многолетний лед распространен в самых глубоких частях пещеры (рис. 10). Он представлен большими древовидными и гексагональными пластинчатыми кристаллами до 25 см в диаметре [Wigley, Brown, 1971]. Такие кристаллы могут формироваться только при температуре, близкой к 0 °C [La Chapelle, 1969]. Многократные измерения температуры в пещере показали, что она в значительной степени остается постоянной и никогда не опускается ниже -0,25 °C. Движение воздуха в пещере отсутствует и граница многолетнего льда медленно отступает вниз вследствие повышения температуры пород. Таянию льда способствуют нисходящие грунтовые воды, образующиеся при вытапливании льда в трещинах известняков, слагающих стены пещеры. Глубина, на которой встречается многолетний лед, соответствует, в основном, зависимости глубины сезонного слоя от высоты местности, которая была установлена при измерении температуры в других скважинах в пределах горы (см. рис. 6). Температура льда также соответствует этой зависимости (см. рис. 4). Наиболее значительное отступление границы льда отмечалось в летние сезоны с сильными ливнями. Отепляющее воздействие подземных вод, несомненно, главный фактор таяния льда на верхней границе мерзлоты.

Структурные грунты

Реликтовые сортированные структурные грунты широко распространены на пологих склонах вершины горы. Встречаются переходы от сортированных каменных колец через сортиро-

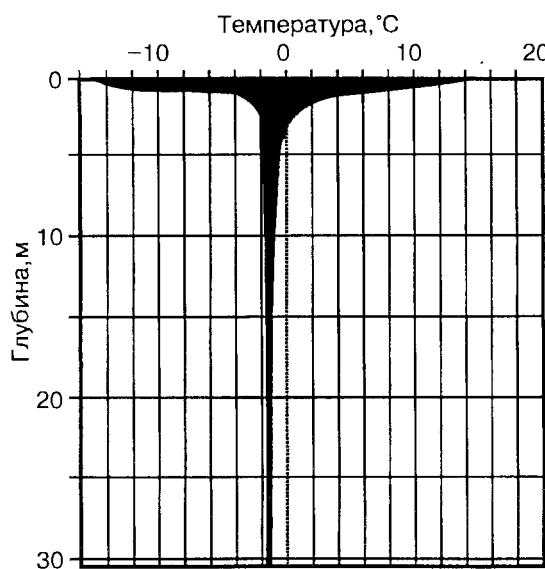


Рис. 9. Огибающие температурных кривых для ПМ № 1 на высоте 2519 м.

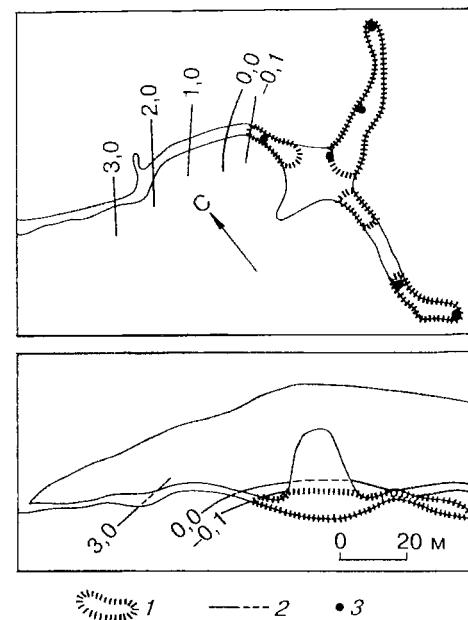


Рис. 10. Местонахождение многолетнего льда в ледяной пещере Плато Маунтин [Harris, 1979].

1 — кристаллы, 2 — T, °C, 8 октября 1976 г., 3 — термопары.

ванные полигоны к сортированным полосам [Woods, 1977]. Эти формы образованы смесью обломков, песка и пыли (рис. 11), которые представляют собой либо отложения на древней эрозионной поверхности вершины горы, либо выветрельные кремнистые известняки. Эти отложения существенно отличаются по гранулометрическому составу от золовых лессов, а их мощность на Плато Маунтин № 2А составляет до 40 м.

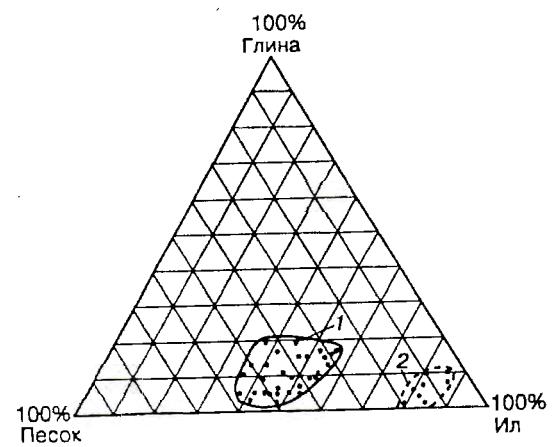


Рис. 11. Распределение размера частиц заполнителя по фракциям в сортированных структурных грунтах Плато Маунтин в сравнении с золовыми лессами из Кипресс Хиллз [Catto, 1981].

1 — фракция <2 мм, 2 — лесс из Кипресс Хиллз.

РЕЛИКТ ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА БЫВШЕМ НУНАТАКЕ

Поверхность камней и глыб в границах сортированных форм имеет характерный покров из лишайников, который отсутствует на их нижней стороне. Отсюда следует, что сортировка имела место много лет назад и сейчас прекратилась. Необычайное разнообразие лишайников на известковом субстрате подтверждает эту идею [Bryant, Scheinberg, 1970]. Местами на вершине горы на каменных кольцах встречаются понижения глубиной до 70 см, которые, видимо, сформировались в результате значительной просадки поверхности вследствие вытаивания жильных льдов. Так как жильные льды и структурные грунты сейчас не формируются на нарушенных поверхностях, эти образования, видимо, возникли во время предыдущего оледенения.

Растительность

Растительность Северной Америки интересна многими особенностями, которые связаны с ее миграцией [Weber, 1965], но природа и направление этих миграций дискуссионны. Перемещалась ли третичная флора на север, формируя растительность панамериканской тундры [Tolmachev, 1959; Hulten, 1962], или флора арктической тундры двигалась к югу в холодные периоды и оказывалась нетипичной для горных вершин, когда климат потепел [Hooker, Gray, 1880; Darwin, 1883; Wallace, 1900]?

На Плато Маунтин было собрано, по крайней мере, 488 видов сосудистых растений, из которых 212 (43%) встречаются в альпийской зоне. Они проявляют исключительное разнообразие географического распространения. Некоторые виды, такие как *Poa pattersoni* и *Epilobium clavatum* типичны для гор юго-западных районов

США. По крайней мере, 10 из них являются панарктическими (например, *Campanula uniflora*), берингийскими (например, *Myosotis alpestris ssp. asiatica*), или амфиатлантическими (например, *Pedicularis flammea*). Они исчезают к югу от Плато Маунтин, что подтверждает правоту Хукера и Грея, Дарвина и Валаса. Другие виды найдены только в пределах хребта Скалистых гор между Джаспером и Ватертон Парком (см. рис. 1), они указывают на местную специфику (например, *Haplopappus lyallii*). Однако другие, такие как *Erigeron aureus*, найдены также в альпийской зоне на вершинах гор в южной части Британской Колумбии.

Плато Маунтин лежит в переходной зоне между boreальными лесами к северу и горными лесами к югу. Однако, чтобы создать условия, при которых альпийские растения могли мигрировать через пустыни и леса из Калифорнии или к югу из Арктики, должно было произойти похолодание, при котором местная растительность вытеснялась тундровой, а ледник при этом не являлся препятствием для миграции растений. Это, скорее всего, имело место в раннем и среднем Висконсине [Harris, 1994]. Это также могло обеспечить возможность этим видам развиваться локально и относительно недавно продвинуться в этот район вдоль Скалистых гор.

Тепловые потоки в реликтовую мерзлоту

В таблице приводится результатирующий нисходящий тепловой поток, базирующийся на измеренном понижении температуры в некоторых горизонтах Плато Маунтин № 1 через 18 мес. после бурения. Нисходящий тепловой поток уменьшается с глубиной. При сравнении зна-

Нисходящий тепловой поток в первых пяти скважинах в мерзлых породах альпийской зоны на вершине
Плато Маунтин через 1,5 года после бурения, на основании измерения теплопроводности и температуры пород
(по материалам [Harris, Brown, 1978])

Участок	Глубина горизонта, м	Понижение температуры с глубиной*, °C	Теплопроводность, ^a W/mK	Тепловой поток через слой, ^b W/m ²	Абс. высота, м
1	4,6—6,1	0,04	5,18	0,136	2519
	6,1—7,6	0,04	5,18	0,136	
	7,6—12,2	0,08	5,18	0,093	
	12,2—15,2	0,04	5,18	0,065	
	15,2—18,3	0,04	5,18	0,063	
	18,3—30,5	0,12	5,18	0,053	
2	12,1—15,2	0,05	5,18**	0,085	2484
3	12,2—15,2	0,03	5,18**	0,051	2438
4	12,2—15,2	0,05	4,92	0,081	2426
5	12,2—15,2	0,05	6,10	0,120	2319

* Разность значений температуры пород, измеренной одновременно на верхней и нижней границах интервала (среднее значение из месячных наблюдений за 1—2 года).

** Величины, полученные для аналогичных пород на участке 1.

^a Определения выполнены А.С.Джаджем, Отдел физики Земли Департамента энергетики, горного дела и запасов, Оттава, Канада.

^b Расчет выполнен Л.Е.Гудрихом, Отдел исследований для строительства Национального Научного Совета, Оттава, Канада.

чений теплового потока в породе на одной и той же глубине в 5 скважинах на вершине горы, наблюдается тенденция к их увеличению с уменьшением высоты местности.

Такое распределение тепловых потоков подтверждает идею, что многолетнемерзлые породы являются реликтовыми и до сих пор не находятся в равновесии с современным климатом. Однако температура пород на вершине горы определяется как минимум четырьмя процессами, действующими в различных частях горы. Наиболее очевидным является кондуктивный теплоперенос, и это учтено в вычислениях (см. таблицу). Вместе с тем фильтрация воды вниз в почву (см. рис. 8) и через трещины в породах в ледяной пещере приводит к увеличению таяния верхних горизонтов мерзлоты. Отсюда различие в температуре на глубинах 6 м и 9 м на Плато Маунтин № 2, составившее в 1984 г. 1,9 °C, что почти в 400 раз превышает нормальный тепловой поток, вычисленный в таблице. В пределах каменного моря это явление было отмечено только в одной буревой скважине из пяти, в то время как в коренных породах вода может проникать только по трещинам. Таким образом, это воздействие не может охватывать более 10% участков каменных морей и 3% массива коренных пород, но все же это остается очень важным фактором. Участки его воздействия со временем могут менять местоположение по мере сокращения мощности мерзлоты.

Как только лед вытаивает из трещин в коренной породе, воздух начинает проникать в них в любое время года [Wigley, Brown, 1971]. Это имеет место там, где коренные породы выходят на поверхность в скалах по периферии Плато и где обычно встречаются участки с воздушными потоками в породах, например, в ледяной пещере каньона Крик [Harris, 1979]. Так как 7 мес. в году средняя температура воздуха ниже

0 °C и 5 мес. выше 0 °C, то происходит охлаждение пород со стороны трещин. Любые подземные воды, проходящие через охлажденную зону, могут замерзать, формируя лед, который играет роль накопителя холода. Таким образом, это будет противодействовать нагреванию, хотя, повторим, это будет иметь место только в 3% массива.

Последний фактор, изменяющий тепловые потоки — это присутствие каменных полей и каменных морей на склонах и частично на вершине горы. В Кулун Жане [Harris, 1996] средняя температура пород под крупнообломочным чехлом может быть на 7 °C ниже, чем на соседних участках без камней. Аналогичные результаты были получены на склонах Плато. Таким образом, современные крупнообломочные чехлы на склонах горы, возможно, снижают скорость прогрева реликтовой мерзлоты основного массива за счет боковых потерь тепла.

На рис. 12 обобщены все известные сведения о тепловых потоках. Можно видеть, что кондуктивный теплообмен обуславливает только часть общего теплового потока. В горах потоки воды и воздуха в массиве 2, а также в поверхностных крупнообломочных чехлах, таких как куррумы, могут локально значительно изменять сроки достижения равновесной температуры пород после климатических колебаний. Воздушные потоки в крупнообломочном чехле охлаждают нижележащие породы. Таким образом, прогноз теплового воздействия климатических изменений на температуру пород в горах значительно более сложен, чем принято учитывать в традиционных простых тепловых моделях. Скорость этих изменений, возможно, нелинейна.

ВЫВОДЫ

В пределах вершины Плато Маунтин распространена реликтовая мерзлота, которая на-

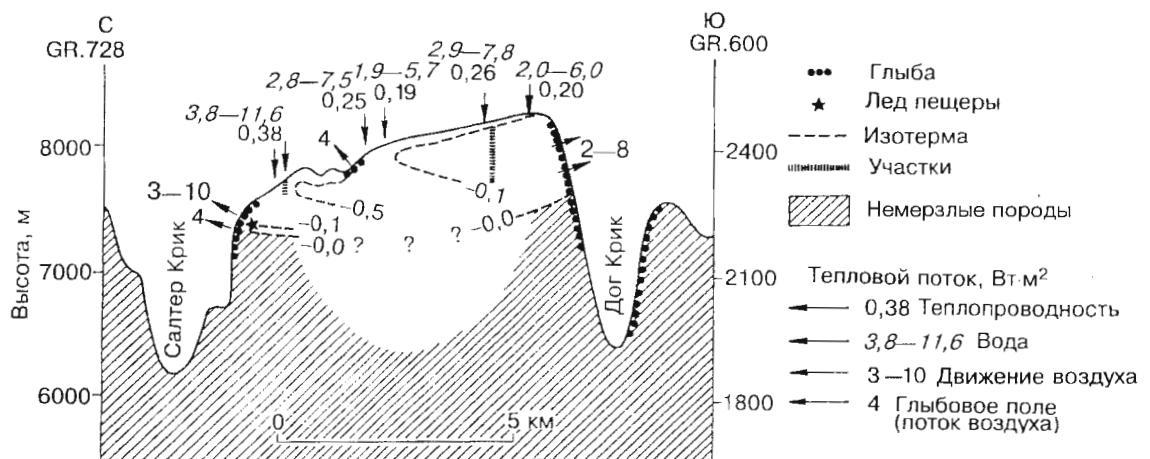


Рис. 12. Обобщение измеренных тепловых потоков, Плато Маунтин.

ходится в неравновесном состоянии по отношению к современному климату. В приповерхностном горизонте температура пород понижается с глубиной и толща прогревается медленно. Тепловой поток в породу — это результат кондуктивного теплообмена потока подземных вод, которому частично препятствует проникновение воздуха через крупнообломочные или трещиноватые коренные породы. Потоки подземных вод и воздуха оказывают большое, но локальное воздействие на температуру пород и это воздействие может изменять местоположение во времени.

Поверхность покрыта структурными грунтами в стадии консервации и термокарстовыми формами, являющимися результатом вытапивания ледяных жил, которые образовались под каменными кольцами при более холодном климате. Альпийская растительность включает отдельные виды из флоры Арктики и западного побережья США южнее Калифорнии, присутствие которых можно объяснить только миграцией альпийской флоры во время прошлых похолоданий. Наблюдается также местная специфика.

Полевые работы финансировались NSERC гранты #A-7483, бурение скважин финансировалось бывшим Отделом исследований для строительства Национального Научного Совета Канады.

Литература

- Bryant J. P., Scheinberg E. Vegetation and frost activity in an alpine fellfield on the summit of Plateau Mountain, Alberta // Canadian Journal of Botany, 1970, vol. 48, p. 751—771.
- Catto N. R. Quaternary geology of the western Cypress Hills region, Alberta and Saskatchewan // Unpublished M.Sc. thesis, Department of Geology, University of Alberta, 1981, 385 p.
- Darwin C. Origin of the Species. New York: D. Appleton & Co, 1859, 458 p.
- Douglas R. J. W. Mount Head map area, Alberta // Geological Survey of Canada, Memoir #291, 1958, 241 p.
- Gold L. W., Lachenbruch A. H. Thermal conditions in permafrost: a review of Northern American literature. Proceedings 2nd International Conference on Permafrost // National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1973, vol. 1, p. 3—25.
- Harris S. A. Ice caves and permafrost zones in southwest Alberta // Arctic, 1979, vol. 22, p. 300—311.
- Harris S. A. Long-term air and ground temperature records from the Canadian Cordillera and the probable effects of moisture changes. Proceedings of the 5th Canadian Permafrost Conference // Nordicana, 1990, vol. 54, p. 151—157.
- Harris S. A. Chronostratigraphy of glaciations and permafrost episodes in the Cordillera of western North America // Progress in Physical Geography, 1994, vol. 18, p. 366—395.

Harris S. A. Lower mean annual ground temperature beneath a block stream in the Kunlun Pass, Qinghai Province, China // Proceedings, 5th National Chinese Permafrost Conference, Lanzhou, 1996, p. 227—237.

Harris S. A., Brown R. J. E. Plateau Mountain: A case study of alpine permafrost in the Canadian Rocky Mountains // Proceedings, 3rd International Conference on Permafrost // National Research Council of Canada, Ottawa, 1978, vol. 1, p. 386—391.

Harris S. A., Brown R. J. E. Permafrost distribution along the Rocky Mountains in Alberta // Proceedings, 4th Canadian Permafrost Conference // National Research Council of Canada, Ottawa, 1982, p. 59—67.

Hooker J. D., Gray A. The vegetation of the Rocky Mountain region and a comparison with that of other parts of the world / U.S. Geological Survey, Terr., 1880, vol. 6, p. 1—62.

Hulten E. The circumpolar plants. I. Vascular cryptogams, conifers, monocotyledons. Kgl. Svensk. Vetensk.-Akad. Handl., ser. 4, 1962, vol. 8, p. 1—275.

Lachenbruch A. H., Marshall B. V. Heat flow in the Arctic / Arctic, 1969, vol. 22, p. 300—311.

La Chapelle E. R. Field Guide to Snow Crystals, University of Washington Press, 1969, 101 p.

Mackay J. R., Rampton V. N., Fyles J. G. Relic Pleistocene Permafrost, western Arctic Canada // Science, 1972, vol. 176, p. 1321—1323.

Norris D. K. Geology and structure cross-sections, Langford Creek (East Half), Alberta // Geological Survey of Canada, Map 1831A, 1993a.

Norris D. K. Geology and structure cross-sections, Langford Creek (West Half), Alberta // Geological Survey of Canada, Map 1838A, 1993b.

Ostrem G. The height of the glaciation limit in southern British Columbia and Alberta // Geografiska Annaler, 1966, vol. 48A, p. 126—128.

Pewe T. L. Ice wedges in Alaska: classification, distribution and climatic significance // Proceedings of the Permafrost International Conference, National Academy of Science // National Research Council of Canada, Publication #1287, 1966, p. 76—81.

Tolmachev A. Sur l'origine de la flore arctique: Quant, ou, et comment surgit la flore arctique? // 9th International Botanical Congress, Toronto. Toronto University Press, 1959, vol. 2, p. 399.

Wallace A. R. Studies, Scientific and Social. New York: MacMillan, 1900, vol. 1, 526 p.

Weber W. A. Plant geography in the southern Rocky Mountains // The Quaternary of the United States. H. E. Wright, Jr. & D. C. Frey (Eds.) Princeton: Princeton University Press, 1965, p. 453—468.

Wigley T. M. L., Brown M. C. Geophysical applications of heat and mass transfer in turbulent pipe flow. Boundary-Layer Meteorology, 1971, vol. 1, p. 300—320.

Woods C. B. Distribution and selected characteristics of high altitude patterned ground in the summit area of Plateau Mountain, Alberta // Unpublished M.Sc. thesis, Department of Geography, University of Calgary, Alberta, 1977, 171 p.

Поступила в редакцию
24 апреля 1997 г.

ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ ИЗВЕСТНЯКА В ПРИМЕНЕНИИ К ГОРНОЙ МЕРЗЛОТЕ (Плато Маунтин, Альберта, Канада)

А. Прик

Географический ф-т, университет Калгари, T2N 1N4, Альберта, Калгари, Канада

Критическая степень водонасыщения пористого известняка в сочетании с его распучиванием и сжатием в процессе промерзания-оттаивания дает представление о процессах, происходящих при морозном выветривании. Расширение образца влажной породы происходит только в условиях его высокого водонасыщения и быстрого охлаждения, при которых усиливается эффект набухания за счет расширения воды при ее замерзании. При низкой степени водонасыщения (что типично для естественных условий) наблюдается сжатие образца, объясняющееся миграцией незамерзшей воды в пористой среде, ведущее к осушению отдельных мелких пор. Осыпные склоны Плато Маунтин позволяют сопоставить результаты таких экспериментов с полевыми исследованиями.

Морозное выветривание, набухание, распучивание, циклы увлажнения/высыхания и замораживание/оттаивание, степень насыщения пор водой, дилатометрия

CRYOGENIC WEATHERING OF LIMESTONES EVALUATED BY LABORATORY TECHNIQUES AND APPLIED TO A MOUNTAIN PERMAFROST AREA (Plateau Mountain, Alberta, Canada)

A. Prick

Department of Geography, University of Calgary, T2N 1N4, Alberta, Calgary, Canada

The critical degree of saturation of a porous limestone combined with its dilatometrical behavior during a freeze / thaw cycle gives a good idea about the processes involved in frost weathering. Dilation of a humid rock sample only occurs under conditions of high saturation and rapid cooling, which emphasizes the influence of the swelling due to transformation of water into ice. With low saturation levels (the most common case in nature), the contraction of a sample can be observed and explained by migrations of unfrozen water within the porous media, leading to the drying of some small pores. The debris slopes of Plateau Mountain provide a good example of the application of such experiments to a field study.

Frost weathering, wetting/drying and freezing/thawing cycles, degree of saturation of a porous, medium with water, dilation, dilatometry

ВВЕДЕНИЕ

Морозное выветривание является одним из важнейших процессов в перегляциальных условиях [Mugridge, Young, 1983; Fahey, Lefebvre, 1988], но некоторые геоморфологи [White, 1976; Mc Greevy, 1981; Hall, 1995] отмечали, что нет достаточных полевых и лабораторных исследований, доказывающих, что превращение воды в лед на самом деле является причиной образования скоплений обломочного материала, типичных для высокогорных и арктических ландшафтов. Помимо промерзания, к расширению могут также приводить и другие процессы, например, набухание при гидратации [White, 1976]. Таким образом, в наиболее общем случае это совокупность различных физических,

химических и биологических факторов [Hall, 1995].

Кроме того, если рассматривать промерзание отдельно, видно, как мало известно о процессах, которые при этом происходят. Новые лабораторные методики, разработанные в геоморфологии в последние годы, позволяют лучше понять относительное влияние отдельных физических процессов, например использование акустической эмиссии [Hallet et al., 1991], импульсного ядерно-магнитного резонанса [Akagawa, Fukuda, 1991] и дилатометрии [Matsuoka, 1990; Prick et al., 1993; Pissart et al., 1993; Prick, 1995]. Эти новые методы не разрушают образец. В первой части статьи представлены результаты

ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

нескольких экспериментов по набуханию влажных образцов мягких и пористых французских известняков, подвергшихся промерзанию и оттаиванию.

Другая проблема заключается в том, что основная часть ранних экспериментальных работ проводилась без соблюдения термических и влажностных условий, соответствующих естественным [Hall, 1986]. Это важный момент, который не был достаточно тщательно учтен раньше. Так, в некоторых работах к образцу прикладывалось разрушающее давление, которого нет при промерзании в естественных условиях. В настоящее время становятся нормой взаимодополняющие наблюдения в поле и лаборатории [Douglas *et al.*, 1983; Hallet *et al.*, 1991] и это способствует моделированию естественных изменений температуры и влажности. Во второй части статьи будет представлен порядок проведения полевых работ совместно с лабораторными экспериментами для оценки воздействия промерзания на некоторые известняки Скалистых гор Канады.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Описание изучаемой породы

Дилатометрические измерения были проведены на 10 образцах французского известняка юрского и мелового возраста, которые используются во Франции в качестве строительного материала. Эти породы были выбраны из-за разнообразия своих физических характеристик и особенно из-за наличия данных по пористости и гистерезиса результатов других исследований по выветриванию. Здесь представлены несколько результатов, полученных при работе с одной из таких пород, Туронским известковым туфом, так называемым Breze. Его общая пористость (измеренная в вакууме) — 47%. Средний диаметр пор, измеренный ртутным порометром через объем пор, составляет 2,58 мк, а пористость бинарная, то есть Breze, имеет два основных класса пор. Из-за таких порометрических характеристик их коэффициент Хиршвальда составляет только 84,34% (коэффициент Хиршвальда — это часть от общего объема пор, в которые вода может проникнуть за 48 ч), таким образом, при насыщении этих пород при нормальном атмосферном давлении в пористой среде сохраняется множество пор с пузырьками воздуха.

Цилиндрические образцы (11 см длиной, 4 см в диаметре) были вырезаны перпендикулярно наслоению. Приготовленные образцы были вымыты и высушены при 50 °C при постоянном весе и перед измерениями ультразвуковым дезинтегратором (Grindosonic) оставлены охлаждаться на открытом воздухе (см. ниже критическую степень насыщения). Для измерения набухания образцы были погружены в дис-

тиллированную воду, по крайней мере, за 3 недели до эксперимента, а затем высушивались на воздухе до достижения ими влажности, требуемой для эксперимента.

Критическая степень насыщения

Влажность оказывает сильное влияние на поведение породы, подвергающейся промерзанию. Степень насыщения зависит не только от способа гидратации образца и продолжительности намокания, но также от размера пор в породе. В этой связи, учитывая зависимость между степенью насыщения образца и его литологией, можно для каждого типа пород определить критическую степень насыщения S_{cr} . При степени насыщения больше и равной S_{cr} порода будет разрушаться при промерзании [Fagerlund, 1971; Weiss, 1992; Prick, 1997]. Значение S_{cr} для каждого материала разное.

Прибор Grindosonic позволяет производить измерения основной частоты вибрации образца соответствующей формы и, таким образом, определять динамический модуль Юнга. Мы использовали его для определения этого модуля в свежих образцах и после того, как эти образцы подвергались 8-кратному циклу промерзания и оттаивания с различной влажностью. Точка перегиба на графике динамического модуля Юнга четко видна на рис. 1. Точка перегиба определяет величину S_{cr} : по мере уменьшения модуля Юнга выветривание происходит при более высоком насыщении пород. Для значений насыщения больше, чем S_{cr} , существует линейная зависимость между скоростью выветривания и уровнем насыщения.

Степень критического насыщения определяется дилатометрические свойства пород, которые

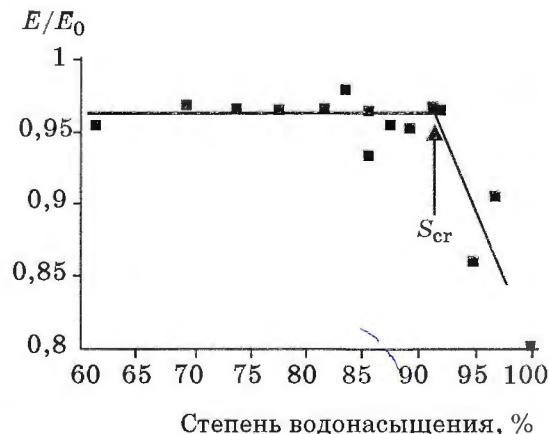


Рис. 1. Определение степени критического насыщения S_{cr} в известняке Breze.

Точка перегиба кривой определяет значение S_{cr} : по промерзанию с высокой степенью водонасыщения, модуль Юнга E значительно снижается по сравнению с исходным значением E_0 .

наблюдаются в цикле промерзания/оттаивания, что и будет проиллюстрировано ниже.

Дилатометрический метод

Измерения набухания пород в результате их промерзания и оттаивания проводились редко [Matsuoka, 1990; Weiss, 1992]. На рис. 2 показано экспериментальное устройство, с помощью которого проведены данные измерения. Дилатометрические показатели измерялись в нескольких местах: в центре круглого основания, у границы этого основания, а также в двух точках друг против друга на поверхности цилиндра. Этими четырьмя измерениями мы регистрировали изменения не только по длине цилиндра, но также по диаметру.

Измерения были проведены линейным электронным преобразователем смещения, дающим колебания размеров с точностью около 5 мк. Основание образца ввинчивалось в стальное основание, на котором были установлены датчики смещения. Эти измерения, а также измерения температуры пород автоматически выполнялись в одном цикле замерзание/оттаивание в климатической камере. Для целей описываемого эксперимента температура задавалась в диапазоне от +20 °C до -20 °C и менялась на 2 °C в час.

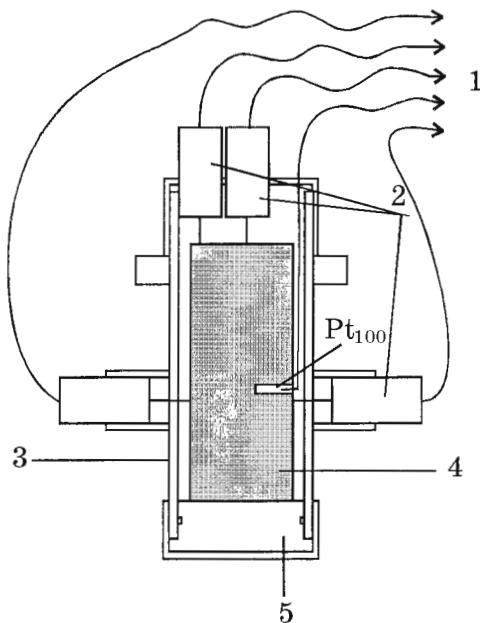


Рис. 2. Экспериментальная установка, использованная для измерения набухания при промерзании/оттаивании образца [Pissart et al., 1993].

1 — к электронному записывающему устройству; 2 — датчики смещения; 3 — металлический цилиндр; 4 — образец; 5 — металлическое основание.

Результаты дилатометрии

На рис. 3 показано дилатометрическое поведение промораживаемого образца (Breze) со степенью водонасыщения 98%, то есть выше степени критического насыщения. В процессе охлаждения наблюдалось сначала термическое сжатие. После короткого периода сжатия начался процесс промерзания и произошло резкое распучивание при постоянной температуре 0 °C (нулевая завеса) за счет изменения объема на 9% при трансформации воды в лед. При понижении температуры в диапазоне отрицательных значений наблюдается небольшое увеличение длины за счет того, что часть связанной воды замерзает при температуре ниже 0 °C.

Когда образец выдерживался при температуре около -18 °C в течение 27 ч, наблюдалось небольшое сокращение по длине, что может быть связано с иссушением мелких пор, из которых незамерзшая вода мигрирует к кристаллам льда, формирующимся в более крупных порах. При нагревании изменения происходят с обратным знаком.

На рис. 4 показано поведение при промерзании такого же образца, но со степенью водонасыщения только 86%, то есть ниже, чем степень критического насыщения. Кривые набухания отличаются от таких же кривых на рис. 3: наблюдается ограниченное набухание и только в период существования нулевой завесы. После этого образец сокращается по длине в результате термического сжатия, а также миграции незамерзшей воды от маленьких пор к большим, к этому моменту уже промерзшим, и к боковой поверхности цилиндра, которая первой встречает фронт промерзания образца и поэтому является более холодной [Prick et al., 1993; Pissart et al., 1993; Prick, 1995]. Этот процесс аналогичен формированию сегрегационного льда в почве, он наблюдался и в других лабораторных опытах [Hallet et al., 1991]. Это особенно четко проявляется в образцах Breze, для которых характерно закупоривание пор, как уже было описано выше.

Сокращение образца известняка под действием высушивания при постоянной положительной температуре уже исследовалось с помощью дилатометра Хэймса и др. [Haines et al., 1987], которые показали, что максимальное изменение длины происходит, когда вода оставляет мелкие поры. Этот эффект вызван в данном случае промерзанием неводонасыщенного пористого материала.

В заключение отметим, что эти эксперименты подчеркивают важную роль влажности в морозном выветривании и показывают, как важно определять степень критического насыщения. Набухание влажных образцов имеет место только в условиях высокого насыщения и быстрого охлаждения, которое усиливает влияние уве-

ЛАБОРАТОРНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИОГЕННОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ

Дилатометрические измерения, мкм

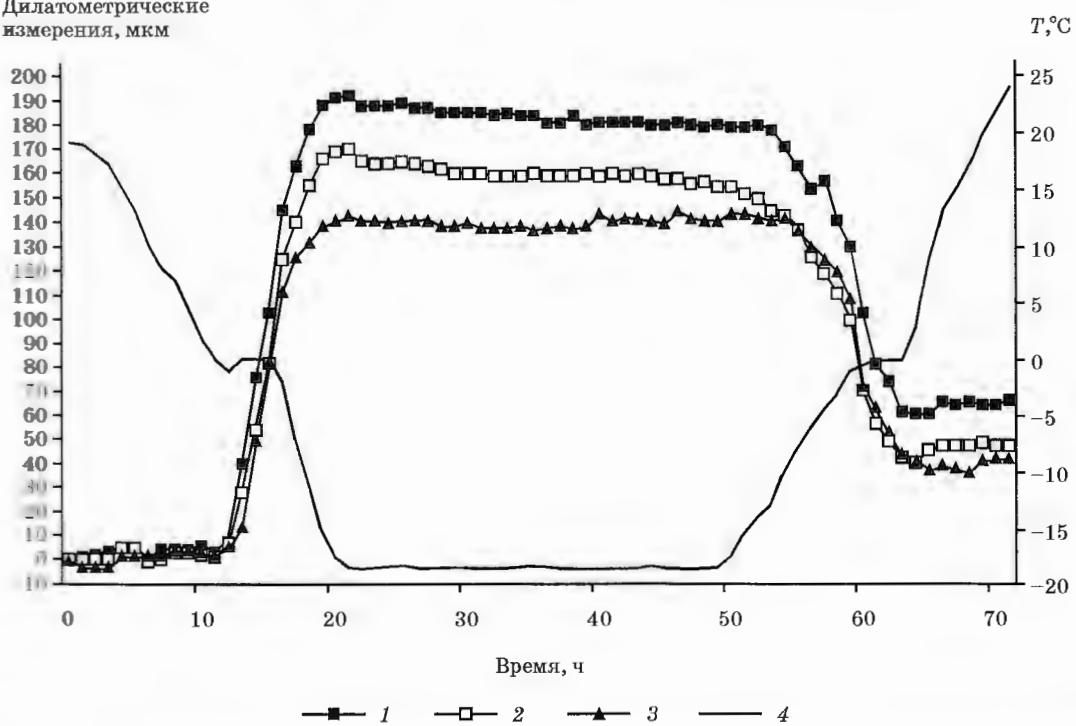


Рис. 3. Дилатометрия образца Breze № 19, подвергнутого циклу промерзания/оттаивания с коэффициентом водонасыщения 98%.

1 — измерения на границе верхней плоскости цилиндра; 2 — измерения в центральной точке верхней плоскости цилиндра; 3 — сумма измерений на образующей цилиндра; 4 — температура в образце, равная температуре, измеренной датчиком Pt₁₀₀ у три образца.

Дилатометрические измерения, мкм

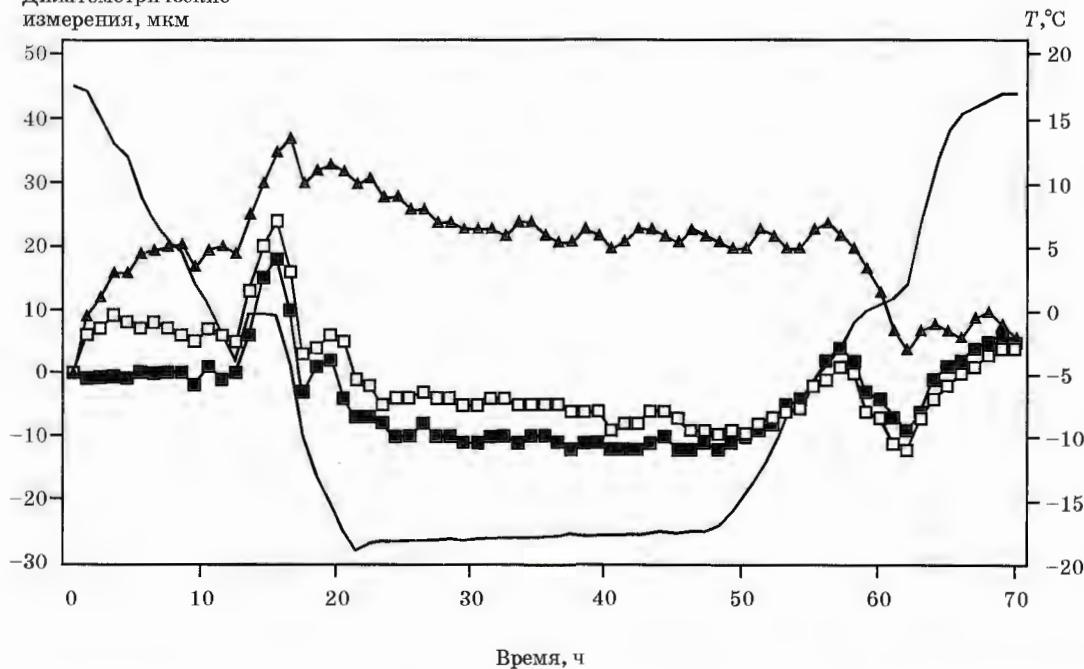


Рис. 4. Дилатометрия образца Breze № 21, подвергнутого циклу промерзания/оттаивания с коэффициентом водонасыщения 86%.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

личения объема при переходе воды в лед. Этим объясняется морозобойное растрескивание пород [Letavernier, Ozouf, 1987]. При низких уровнях насыщения (что чаще встречается в естественных условиях) это набухание малозаметно и обычно происходит сжатие образца. Это можно объяснить миграцией незамерзшей воды внутри пористого материала, приводящей к иссушению более мелких пор и формированию линз льда вблизи поверхности. Это приведет к выветриванию образца в результате [Letavernier, Ozouf, 1987], а не в связи с высокой степенью насыщения и быстрым охлаждением. Таким образом, раскалывание породы, видимо, довольно редкий вид выветривания в геоморфологии, как другие авторы уже предполагали, возможно, что роль увлажнения и иссушения может быть более значительна, чем предполагалось до сих пор [White, 1976].

Дополнительные доказательства миграции незамерзшей воды

В мерзлом состоянии некоторые образцы Breze были послойно разрезаны алмазной пилой в морозильной камере Гляциологической лаборатории Брюссельского Университета. Целый образец был разрезан на мелкие кусочки размером от 1 см³ и менее, которые были взвешены после промерзания, а затем высушены при температуре 50 °C и затем повторно взвешены для определения влажности. Предварительное испытание перед охлаждением было проведено для того, чтобы убедиться, что распределение воды в образце перед промерзанием — равномерное. На рис.5 показаны изолинии влажности после промерзания для всего распиленного образца Breze, который до промораживания имел степень насыщения 75%. Часть воды мигрировала от центра образца (где коэффициент водонасыщения после промерзания составил 45%) к боковой поверхности: относительная влажность здесь после промерзания оказалась более 85%. Лед в основном образовался внутри пористого материала, а не на поверхности образца.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭТОГО МЕТОДА В ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Цель исследования

Как уже подчеркивалось во введении, вопрос, является ли воздействие мороза определяющим фактором выветривания в холодных регионах, все еще не решен. На данном уровне знаний лучший путь попытаться решить вопрос о воздействии мороза — это объединить несколько лабораторных испытаний с полевыми исследованиями в районах, характеризуемых быстрым разрушением выходящих на поверхность пород.

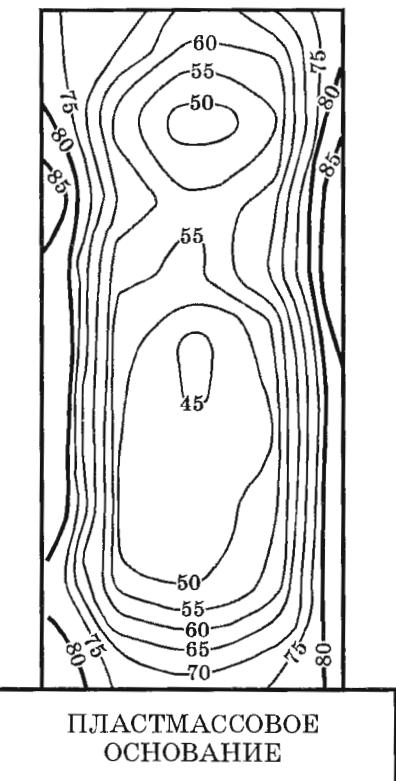


Рис. 5. Сечение цилиндрического образца породы Breze после промерзания с изолиниями коэффициента водонасыщения через 5%; степень водонасыщения породы до промерзания 75%. (Подробнее — в [Prick, 1995]).

Осыпные склоны Плато Маунтин (Альберта, Канада) позволяют успешно применить такие эксперименты в полевых исследованиях. Осыпные склоны гораздо больше распространены в этих местах, чем где-либо еще в Скалистых горах Юго-Западной Альберты, где на поверхность выходят известняки того же возраста. Для этих гор характерно распространение реликтовой мерзлоты, исследованием которой занимается С. Харрис (1997). Плато Маунтин представляет собой пологую антиклиналь, сложенную субгоризонтальными слоями осадочных пород карбона, главным образом известняками и доломитами. Обнажающиеся породы являются источником обломочного материала на склонах. Доступность известняков для исследования была очень важна, так как большинство методов измерения морозного воздействия разрабатывались для известняков. Насколько нам известно, это первые исследования такого рода в Северной Америке.

Перспективы исследований

Чтобы проверить, может ли одно морозное воздействие разрушить такое большое количест-

во известняков, была проведена оценка прочности двух различных фазий породы в полевых и лабораторных условиях. Так как необходимо хорошо знать физические характеристики породы для объяснения процессов, протекающих при замерзании, была измерена пористость этих известняков с помощью ртутного порометра в Геоморфологическом Центре в Каннах (Франция).

Несколько образцов было доставлено в Центр в сентябре 1996 г. Их пористость (измеренная в вакууме) и их модули Юнга будут измерены снова весной и осенью 1997 г. для того, чтобы сравнить различие зимнего и летнего выветривания. Действительно, возможно, что чаще или реже повторяющийся ежедневный ночной мороз в течение лета может быть более разрушителен по отношению к этим породам, чем продолжительное зимнее промерзание, так как зимой образцы часто покрыты снегом.

В лаборатории поведение этих пород при увлажнении и иссушении при постоянной температуре оценивалось дилатометрией [Hames et al., 1987] по потере веса и модулю Юнга. Когда исследуется влияние мороза, большое значение имеют опыты по увлажнению и иссушению. Так как все опыты с промораживанием и оттаиванием выполняются с влажными образцами, то невозможно было бы разделить воздействие влаги на породу от действительного воздействия превращения воды в лед.

Степень критического насыщения будет определена с помощью аппарата Grindosonic. На основании этих результатов в Льежском Университете (Бельгия) будет выполнена дилатометрия таким же образом, как описано в этой статье. Интересная часть исследований — это тесты на измельчаемость. Они состоят в оценке потери веса образца в зависимости от количества циклов промерзания и оттаивания и успешно использовались в исследованиях ранее [Letavernier, Ozouf, 1987]. Такие испытания выполнены при различных температурах в Калгари (в диапазоне +20 °C и -20 °C), Каннах (в диапазоне +12 °C и -5 °C) и Льеже (в диапазоне +3 °C и -3 °C).

Предварительные результаты и область применения

Первые результаты подчеркивают малую потерю веса в известняках, подвергшихся ежедневному циклу промерзания /оттаивания в диапазоне температур +20 °C и -20 °C. Возможно, другие процессы, такие как снятие давления, могли оказывать некоторое воздействие на эти породы, геологическая история которых включает формирование складчатости Скалистых гор в результате столкновения прибрежных плит юго-Северо-Американской платформы. Их пористость крайне низкая (0,38—1,22 %). В соот-

ветствии со шкалами чувствительности, установленными другими авторами [Letavernier, Ozouf, 1987] и нашими предыдущими работами [Prick, 1997], известняк с такой низкой пористостью не чувствителен к промерзанию.

Дилатометрический метод, объединенный с измерением критической степени насыщения — это хороший способ оценить чувствительность пород к промерзанию, наблюдать их поведение и определить, какой вид миграции воды имеет место. Однако наша экспериментальная методика и размер наших образцов позволяет нам только наблюдать разрушение и масштаб выветривания. Существует другой тип морозного выветривания: расклинивающее воздействие воды, попадающей в трещины и при замерзании разрушающей их [Letavernier, Ozouf, 1987]. Этот процесс, возможно, очень широко распространенный компонент выветривания в естественных условиях. Он изучался и моделировался в лаборатории [Davidson, Nye, 1985; Tharp, 1987; Matsuoka, 1995]. В настоящее время мы технически не можем проверить значение этого процесса и сравнить с результатами моделирования, но ясно, что он может играть важную роль в откалывании фрагментов породы в поле, особенно в случае плотных известняков с низкой пористостью [Matsuoka, 1995].

Если наша работа подтвердит предварительные результаты, показывающие слабое участие промерзания в выветривании этих известняков, в нашей следующей работе мы постараемся найти другой процесс, объясняющий это явление.

ВЫВОДЫ

Разработанный лабораторный метод объединяет дилатометрические измерения в течение цикла промерзания/оттаивания и оценку степени критического насыщения. Это может дать ценную информацию при исследовании морозного выветривания и определить различные процессы, участвующие в морозном выветривании в естественных условиях. Изучение осыпных склонов Плато Маунтин представляет интерес в качестве применения лабораторных методов в полевых исследованиях. Мы надеемся, что эта работа привнесет некоторые новые элементы в решение важного вопроса: так ли часто морозное выветривание участвует в формировании геоморфологического облика холодных регионов [Hall, 1995].

Я выражаю глубокую признательность проф. А. Писсару за помощь и советы в лабораторной работе и проф. С. Харрису за помощь и обоснование полевых исследований. Я также благодарю д-ра Дж.-К. Озоуфа из Геоморфологического центра в Каннах, проф. Р. Соучеза и д-ра Дж. Л. Тисона из Университета Брюсселя.

Мы высоко ценим техническую помощь Дж. Л. Женикота, которая стала возможна благодаря „Прайм Проджект“, Министра региона Валлон, которому я весьма признателен.

Литература

- Akagawa S. & Fukuda M. Frost heave mechanism in welded tuff // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, 2, 4, p. 301 — 310.
- Davidson G.P. & Nye J.F. A photoelastic study of ice pressure in rock cracks // *Cold Regions Science and Technology*, 1985, 11, p. 143—153.
- Douglas G.R., Mc Greevy J.P. & Whalley W.B. Rock weathering by frost shattering, Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost (Fairbanks, Alaska, July 1983), Washington D.C. : National Academy Press, 1983, p. 244—248.
- Fagerlund G. *Degré critique de saturation, un outil pour l'estimation de la résistance au gel des matériaux de construction*, Matériaux de Construction, 1971, 4 (23), p. 271—285.
- Fahey B.D. & Lefebvre T.H. The freeze-thaw regime of a section at the Niagara escarpment on the Bruce Peninsula, Southern Ontario, Canada // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13, p. 293—304.
- Hall K. Rock moisture content in the field and the laboratory and its relationship to mechanical weathering studies // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11, p. 131—142.
- Hall K. Freeze-thaw weathering : the cold region „panacea“// *Polar Geography and Geology*, 1995, 19, 2, 79—87.
- Hallet B., Walder J.S. & Stubbs C.W. Weathering by segregation ice growth in microcracks at sustained subzero temperatures: Verification from an experimental study using acoustic emissions // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, 2, p. 283—300.
- Hames V., Lautridou J.P., Ozer A. & Pissart A. Variations dilatométriques de roches soumises à des cycles „humidification — séchage“ Bulletin de l'Association FranHaise pour l'Etude du Quaternaire, 1987, 3, p. 133—138.
- Harris S.A. A relict of Late Quaternary permafrost on a former nunatak at Plateau Mountain, S.W. Alberta, 1997. Paper presented at this conference.
- Letavernier G. & Ozouf J.Cl. Résultats des recherches récentes sur la gélification des calcaires // *Inter-Nord*, 1987, 18, p. 53—63.
- Matsuoka N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach // *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 17, p. 253—270.
- Matsuoka N. A laboratory simulation on freezing expansion of a fractured rock : preliminary data // *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Dec. 1995, 21, p. 5—8.
- Mc Greevy J.P. Some perspectives on frost shattering // *Progress in Physical Geography*, 1981, 5, 1, p. 57—75.
- Mugridge S.J. & Young H.R. Disintegration of shale by cyclic wetting and drying and frost action // *Canad. J. Earth Sci.* 1983, 20, p. 568—576.
- Pissart A., Prick A. & Ozouf J.Cl. Dilatometry of porous limestones undergoing freezing and thawing // *Proceedings of the VIII International Conference on Permafrost*, 5—9 July 1993, Beijing, China, 1993, 1, p. 523—527.
- Prick A., Pissart A. & Ozouf J.Cl. Variations dilatométriques de cylindres de roches calcaires subissant des cycles de gel-dégel // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1993, 4, p. 1—15.
- Prick A. Dilatometrical behavior of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles // *Catena*, Special Issue, 1995, 25 (1-4), p. 7—20.
- Prick A. The critical degree of saturation as a threshold moisture level in frost weathering of limestones // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1997, in press.
- Tharp T.M. Conditions for crack propagation by frost wedging, *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 99, p. 94—102.
- Weiss G. Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinsspezifischer Parameter // *Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, B, 1992, 9, 118 p.
- White S.E. Is frost action really only hydration shattering ? // A review, *Arctic and Alpine Research*, 1976, vol. 8, 1, p. 1—6.

Поступила в редакцию
24 апреля 1997 г.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИЙ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

А.А. Васильев, Д.С. Дроздов

Институт криосферы Земли СО РАН, 117982, Москва, ул. Вавилова, 30/6, к.74а, Россия

Применительно к районам рудных месторождений в криолитозоне предложено выделять территории 4-х категорий устойчивости:

- 1) устойчивые — инженерная деятельность не вызывает негативных изменений в геологической среде;
- 2) условно устойчивые — возможна активизация процессов;
- 3) неустойчивые — инженерная деятельность вызывает изменения, трудно поддающиеся рекультивации;
- 4) особо неустойчивые — угрожает полное разрушение поверхности.

Для каждой территории дается информация о фоновых и прогнозных (при 100%-м нарушении поверхности) геокриологических и геохимических характеристиках. Контурым знаком выносится величина современной техногенной нарушенности.

Эколого-геологические условия, устойчивость геологической среды, техногенные изменения, активизация экзогенных процессов, geoхимическое загрязнение

TECHNIQUE AND RESULTS OF LARGE-SCALE ECOLOGO-GEOLOGICAL ENVIRONMENTAL RESEARCH OF ORE FIELDS IN CRYOLITOZONE

A.A. Vasiljev, D.S. Drozdov

Earth Cryosphere Institute SB RAS, 117982, Moscow, Vavilov st., 30/6, room 74a, Russia

Four main gradations of environmental (eco-geological) stability for territories of mining deposits in cryolitozone are established:

- 1) stable territories, on which the engineering activity does not cause negative changes in geological environment;
- 2) conventionally stable territory, on which some activization of exogenic geological processes can take place;
- 3) unstable territories, on which the engineering activity causes significant landscape changes which are difficult for recultivation;
- 4) especially unstable territories, which threatens with complete disturbance of surface by activization of geocryological processes.

The information about natural and forecasting (at 100 % technogenic surface disturbance) geocryological and geochemical characteristics for each area is provided on the eco-geological map. The grade of modern technogenic disturbance will be also show by additional contours.

Environmental (eco-geological) stability, technogenic surface disturbance, activization of exogenic geological processes, geochemical pollution

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ

Экогеологические условия (ЭГУ) территорий определяются природными и техногенными факторами, которые находятся в тесной взаимосвязи друг с другом. В связи с растущим объемом техногенного вмешательства экологические аспекты освоения и обустройства территорий приобретают первостепенное значение

[Островский и др., 1992; Островский и др., 1995; Требования..., 1990а, б, в; Царев, 1992]. В криолитозоне особое значение имеет учет и прогнозная оценка взаимодействия источников техногенеза с геологической средой, покровами, внешними средами [Гарагула, 1985; Изучение..., 1992; Мельников и др., 1992].

В качестве критериев экогеологической оценки территорий рудных месторождений в

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ КРУПНОМАСШТАБНЫХ

низкогорных районах криолитозоны учитываются следующие природные факторы: тектоническая дислокированность; морфология поверхности и состояние покровов; температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд; состав, мощность, влажность-льдистость и плотность грунтов, а также наличие повторно-жильных льдов (ПЖЛ); интенсивность проявления экзогенных геологических процессов (ЭГП) по двум группам: термокарст и связанные с ним процессы (как наиболее опасные), прочие процессы; глубина залегания и степень выветрелости коренных пород; гидрогеологические условия; химический и микрокомпонентный состав почв, грунтов, вод.

Информация об элементах природной обстановки обобщается на основании данных, содержащихся на геологической, инженерно-геокриологической, гидрогеологической, ландшафтной и/или геоморфологической картах, на картах инженерно-геокриологического и геохимического опробования.

Техногенная составляющая экогеологической обстановки оценивается по степени нарушения поверхности (в % от площади) комплексом санкционированных и несанкционированных технологических, транспортных и хозяйствственно-бытовых мероприятий и действий. Источниками техногенеза являются здания и сооружения, горные выработки, отвалы и хвостохранилища, транспортные и энергетические коммуникации, водохозяйственные объекты, лесные вырубки и горельники и пр. Из состава техногенных факторов исключается воздействие лесных пожаров прошлых десятилетий, которые сформировали экологическую обстановку, рассматриваемую на настоящий момент как фоновую. Элементы техногенной обстановки идентифицируются в соответствии с данными специальных исследований и опробования, со схемами обустройства месторождения, с экологическими паспортами, с материалами повторных аэрофотосъемок.

Исходя из сложившейся схемы разведки и освоения конкретного месторождения для оценки экогеологической устойчивости осуществляется прогноз техногенных изменений геокриологических условий. Для прогноза используются расчеты и метод аналогий.

Графическая информация о природных условиях, техногенном воздействии и прогнозе изменений представляется на единой картографической основе масштаба 1:2 000—1:25 000. В качестве контурной основы используется ландшафтная и/или инженерно-геокриологическая карта месторождения, а также схема инженерных объектов, коммуникаций, горных выработок и пр.

Основное изобразительное средство (крап и штриховка для черно-белой карты и цвет для

цветной карты) используется для отображения **устойчивости геологической среды** по отношению к комплексу техногенных нарушений, связанных с работой горнодобывающего комплекса. Понятие устойчивости рассматривается авторами в соответствии с общепринятыми представлениями [Гарагуля, 1985; Геоэкология..., 1992; Головковская и др., 1989; Мельников и др., 1992; Островский и др., 1992 и др.] как способность геологической среды сохранять свои основные свойства и пространственно-временную структуру. Соответственно, на карте отображается информация как статического характера (состояние среды), так и прогнозного (степень и сила техногенных изменений при освоении). Устанавливается 4 основные градации устойчивости. Соответствующие территории рассматриваются как области: устойчивые (У), на которых инженерная деятельность не вызывает (не вызывает) негативных изменений в геологической среде; условно устойчивые (УУ), на которых возможно некоторое изменение или активизация комплекса ЭГП, а негативные последствия могут быть компенсированы мероприятиями по рекультивации поверхности и текущему ремонту инженерных объектов; неустойчивые (НУ), на которых инженерная деятельность вызывает или активизирует комплекс ЭГП, существенно меняющий облик поверхности, что трудно поддается рекультивации и нарушает нормальную работу объекта; особо неустойчивые (ОНУ), на которых техногенез угрожает полным разрушением поверхности за счет активизации мерзлотных процессов и приостановкой функционирования объекта.

В пределах областей выделяются районы, различающиеся по комплексу фактических и прогнозных свойств геологической среды и ЭГП. Районы в свою очередь ранжируются по степени устойчивости в рамках соответствующей градации. Районы делятся на участки, различающиеся по тем или иным параметрам, но не подлежащие ранжированию по степени устойчивости.

В экспликации к экогеологической карте для каждого района или участка приводится перечень входящих в них единиц ландшафтного и/или инженерно-геокриологического районирования, а также информация о фоновых и прогнозных (при 100%-ном нарушении) геокриологических характеристиках. Эта информация при наличии графической возможности дублируется в виде таблиц-врезок внутри контуров экогеологической карты. Дополнительным контурным знаком выносится величина современной техногенной нарушенности в градациях 5—25, 25—50 и 50% [Островский и др., 1992].

Геохимическая информация характеризует состояние поверхностных и подземных вод, дон-

ных осадков, почв, грунтов, растительности на момент составления карты и дается в виде площадной или точечной нагрузки в градациях ПДК. Характеризуются фенолы, нефтепродукты и типоморфные для конкретного месторождения микроэлементы.

ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЮЧЮС

Согласно предложенной методике была выполнена эколого-геологическая оценка Кючюсского золоторудного месторождения Северной Якутии. Здесь в долине руч. Кючюс разведана россыпная залежь, а на прилегающих водораздельных пространствах нагорной террасы и террасоувалов ведется разведка и опытная разработка коренной залежи.

Долина руч. Кючюс, врезанная в триасовое алевролитовое плато, выполнена галечным аллювием с песчано-супесчаным заполнителем. Цоколь нагорной террасы высотой несколько десятков метров сложен трещиноватыми триасовыми алевролитами, перекрытыми щебнистым элювием и щебнисто-суглинистым делювием мощностью 0–10 м. В пределах террасоувалов коренные породы перекрыты отложениями ледового комплекса мощностью до 35 м. Это пылеватые супеси и суглинки с повторно-жильными льдами, занимающими до 35% объема — так называемая едомная толща.

Породы находятся в многолетнемерзлом состоянии. Температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд составляет $-7\ldots-10^{\circ}\text{C}$.

Основой для эколого-геологической карты послужила ландшафтная карта территории, составленная на основе дешифрирования АФС и маршрутных наблюдений. На ландшафтной карте выделены природные геосистемы (природно-территориальные комплексы — ПТК) ранга ландшафтов и составляющих их урочищ. Ландшафты для рассматриваемой площади являются ПТК-индивидуами, а урочища типизированы. Для каждого типа урочища по данным натурных наблюдений получены природные значения геокриологических параметров и активности ЭГП, а также оценены изменения этих параметров при разной степени имеющихся нарушений. Расчетным путем и по методу аналогий оценены масштабы изменений на случай 100%-го нарушения покровов. Фрагмент ландшафтной карты приведен на рис. 1. В структуре представленного участка выделяются 4 ландшафта, включающие в свой состав по несколько типов урочищ.

В соответствии с принятой методикой для каждого урочища оценена устойчивость к возможным техногенным нарушениям и составлена эколого-геологическая карта (рис. 2), легенда к которой представлена в табл. 1, а экспликации — в табл. 2.

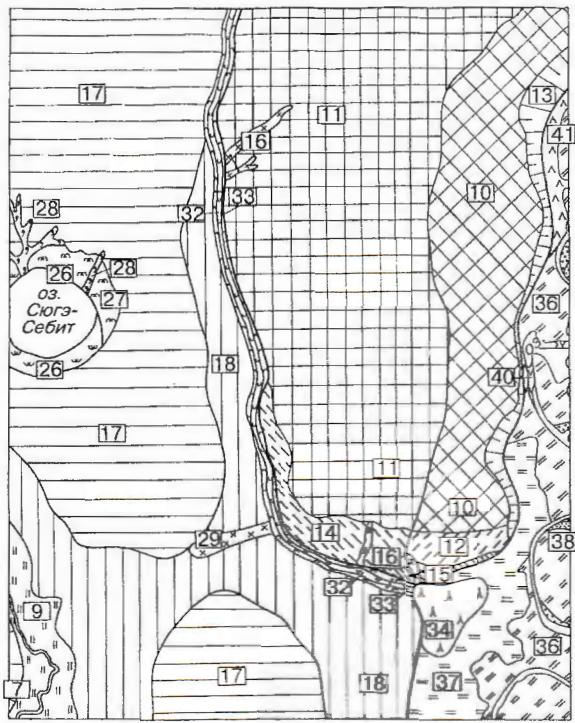


Рис. 1. Фрагмент ландшафтной карты месторождения Кючюс (номера урочищ приведены в соответствии с принятым для района перечнем).

Ландшафт регионального водораздела: 7 — коллювиальные склоны (до 35°) водораздельной поверхности; 9 — нерасчлененная пойма небольшого ручья с щебнисто-гравийно-супесчаным аллювием. Денудационный ландшафт нагорных террас и террасоувалов: 10 — пологовалические (1,5—2,5°) поверхности с щебнисто-суглинистым залеганием мощностью до 2—5 м; 11 — то же с суглинистым с щебнистым делювием мощностью до 5—10 м с ПЖЛ; 12 — крутые (до 27°) склоны с супесчано-щебнисто-глыбовым залеганием; 13 — обвально-осипные (30—50°) склоны; 14 — крутые (до 20°) склоны с супесчано-суглинистым залеганием мощностью до 2—10 м с ПЖЛ; 15 — слабо наклонные (1—2°) делювиальные шлейфы с супесчаными отложениями мощностью 2—5 м с ПЖЛ; 16 — ложбины стока глубиной 2—3 м с пылевато-супесчаным аллюво-делювиальным залеганием мощностью 2—5 м с ПЖЛ. Аккумулятивный ландшафт нагорных террас и террасоувалов: 17 — полого-волнистые поверхности, сложенные едомной толщей мощностью до 35 м, с лыжностью за счет ПЖЛ до 35%; 18 — солифлюкционные склоны (5—10°), сложенные едомной толщей мощностью 20—35 м, с лыжностью за счет ПЖЛ до 30%; 26, 27 — склоны оврагов косогоры эрозионно-термоденадиционные с байцажами (26) и опыленно-оползневые (27) крутизной 12—15°, сложенные частично разрушенной едомной толщей, с лыжностью за счет ПЖЛ до 25%; 28, 29 овраги (28) и ложбины (29) стока глубиной 3—8 м с маломощным глинистым аллювием, подстилаемым едомной толщей мощностью до 10—15 м; 32, 33 — долина (32) и склоны (33) долин ручьев на террасоувалах, сложенные оторфованными пылеватыми супесчаными мощностью 5—10 м; 34 — супесчано-суглинистые конусы выноса. Ландшафт долины руч. Кючюс: 36, 37 — дренированные (36) и заболоченные (37) средние поймы, сложенные супесями, подстилаемыми галечниками; 38 — низкие поймы, сложенные галькой с песчано-супесчаным заполнителем; 40, 41 — дренированные (40) и заболоченные (41) старичные конусы, выполненные пылеватыми супесчаными и песчаными с общим органики.

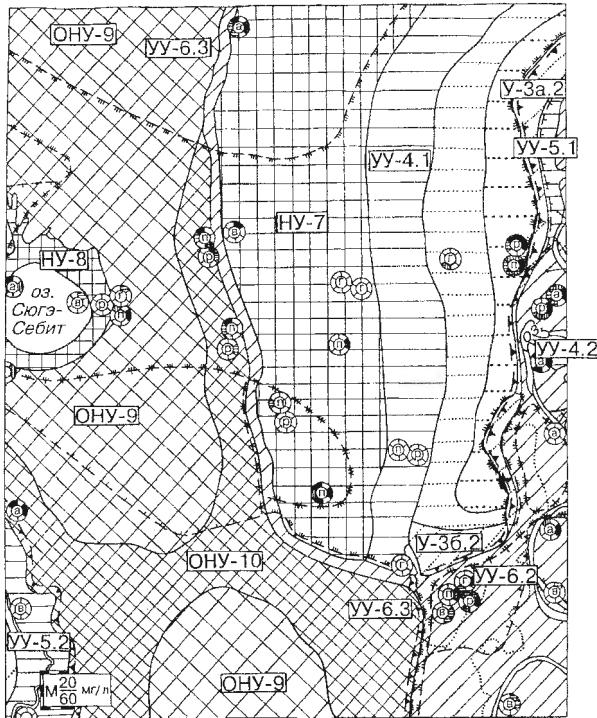


Рис. 2. Фрагмент эколого-геологической карты месторождения Кючюс (усл. обозн. см. в табл. 1; экспликации см. в табл. 2).

К устойчивым с экологической точки зрения в пределах рассматриваемого фрагмента относятся площади с близким залеганием скальных пород триаса (У-1, 2), а также осыпи на склонах (У-3а.2). Свойства пород здесь в результате техногенеза не изменяются, а техногенная активизация процессов не произойдет.

К условно устойчивым отнесены долины ручьев (УУ-5.2, 6.2, 6.3) и верхняя часть дельвиально-солифлюкционного склона нагорной террасы (УУ-4.1) с маломощным ледовым комплексом (2—5 м). Техногенное вмешательство не может вызвать здесь существенной активизации ЭГП (особенно связанных с термокарстом) и нарушения гомеостазиса литогенной основы природных комплексов.

К неустойчивым отнесены два типа областей. Первая — область развития маломощного (до 10 м) ледового комплекса на поверхности нагорной террасы (НУ-7), а вторая — обрамление озер на террасоувалах (область НУ-8). Здесь при нарушении покровов возможна активизация термокарста, байджараообразования и различных форм эрозии.

Особо неустойчивы к техногенезу поверхности и склоны террасоувалов. На поверхностях (ОНУ-9) главный изменяющий процесс — тер-

мокарст, ведущий к образованию замкнутых котловин; на склонах (ОНУ-10) — незатухающий термокарст, поддерживаемый термоэрзией.

Современная техногенная нарушенность связана как с собственно деятельностью горного производства, так и с его инфраструктурой. В том числе в их нерациональных и несанкционированных формах. Наиболее сильные нарушения поверхности (70—100%) сконцентрированы в долине руч. Кючюс и на уступе нагорной террасы, однако в силу устойчивости этих территорий значительных изменений в геологической среде и активизации ЭГП не наблюдается.

Широкая полоса сильных нарушений (50% поверхности) тянется по террасоувалам. Здесь повсеместно имеются признаки клумбовидного рельефа, т.е. начальной стадии термокарста. Полоса сильных нарушений обрамляется малонарушенными территориями.

Экогеохимическое опробование свидетельствует о естественно-напряженной обстановке в основных ландшафтных средах. Естественная концентрация микроэлементов I и II групп токсикологической опасности в природных водах близки к критическим (в среднем 0,86 ПДК). Наименьшую степень загрязненности имеют грунты. Признаков массового техногенного загрязнения не обнаружено.

ВЫВОДЫ

Разработана методика крупномасштабных эколого-геологических исследований площадейрудных месторождений в криолитозоне. Методика основана на геоэкологической оценке состояния и динамики ландшафтных, инженерно-геокриологических и геохимических условий при техногенных воздействиях, характерных для освоения месторождений. Основным элементом методики является ранжирование территорий в пределах месторождения и зоны его влияния по степени устойчивости к техногенному вмешательству. Выделяются 4 категории областей от устойчивых до особо неустойчивых. Каждая область разделяется на районы и участки, отличающиеся по комплексу свойств геологической среды по неблагоприятным геологическим процессам и по возможной реакции на хозяйственную деятельность.

Методика опробована на примере крупного золоторудного месторождения Северной Якутии. Составленная по разработанной методике эколого-геологическая карта характеризует современные экогеологические условияплощади, их природную и техногенную составляющие. Она содержит прогноз развития ЭГУ для сценария сложившейся практики освоения месторождения. Карта является основой для ведения экологичес-

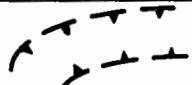
**Таблица 1. Легенда к эколого-геологической карте месторождения Кючюс
А. СТЕПЕНЬ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕРРИТОРИИ**

Б. ТЕХНОГЕННАЯ НАРУШЕННОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Нарушенность территории	5–25%	25–50%	более 50%
			
	— сочетание территорий с различной степенью нарушенности поверхности		

Окончание табл. 1

В. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

Zn Pb  Sb	Hg As Cd	—	точечная пробы по 6 микроэлементам. Буква в центре круга – вид опробованной среды: в – вода; г – грунт; д – донные осадки; п – почва; р – растительность	
Уровень загрязнения	< 0.5 ПДК	0.5–1.0 ПДК	1–5 ПДК	> 5 ПДК
				
	—	потенциальная область быстрого химического загрязнения		
20 M — мг/л 60	—	мутность речного стока:	в межень	в паводок

Г. СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ЭКЗОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ (на экспликациях и врезках)

У-2		ПТК: 1, 10		индексы района и ПТК геол. индекс; состав и мощность пород показатель экогеологических условий (ЭГУ) температура ММП, °C мощность СТС, м плотность грунта, г/см³ льдистость за счет ПЖЛ суммарная влажность и грунтовая льдистость пораженность площади процессами, доли ед. солифлюкция заболачивание эрозия, термоэрозия термокарст байджарахи полигональное растрескивание осыпи и обвалы клины ПЖЛ (вверху – ширина по верху, м; внизу – высота клина, м)	
T ₂ , eT ₂	Показатель	Алевролиты и их элювий (до 2 м)			
ЭГУ	Условия				
t, °C	естеств.	наруш.*)			
СТС, м	1.2...2.2	1.2...2.5			
ρ, г/см³	2.6...2.73	2.6...2.73			
i _{пжл} , %	0	0			
W _c ≈i _{вр} , %	10	10			
Процессы, д.е.					
⌚	0.3	0.7			
≡	0.3	0.5			
∠	нет	0.3			
⊖	нет	0.5			
—	нет	0.3...0.5			
#	0.3	нет			
..	—	—			
3-5 до 5	—	—			

*) при 100%-ном нарушении поверхности

Таблица 2. Экспликации для типичных районов и участков разной степени устойчивости

У-1, 2	ПТК: 1, 10	
eT ₂ , T ₂	Алевролиты и их элювий (до 2 м)	
Показатель ЭГУ	Условия	
	естеств.	наруш.
t, °C	-7...-9	-7...-9
СТС, м	1.2...2.2	1.2...2.5
ρ, г/см ³	2.6...2.7	2.6...2.7
i пжл, %	0	0
W _c ≈i _{вг} , %	10	10
<i>Процессы, д.е.</i>		
∅	нет	нет
∠	нет	нет
⊕	нет	нет
#	нет	нет
..	нет	нет
↑	нет	—
У-3а.2	ПТК: 5, 6, 7, 13	
	Щебень алевролитов (2-5 м)	
Показатель ЭГУ	Условия	
	естеств.	наруш.
t, °C	-7...-9	-7...-9
СТС, м	1.2...2.0	1.2...2.4
ρ, г/см ³	2.1...2.35	2.1...2.35
i пжл, %	0	0
W _c ≈i _{вг} , %	5...20	5...15
<i>Процессы, д.е.</i>		
∅	нет	нет
∠	нет	нет
⊖	нет	нет
#	нет	нет
..	0.3...1.0	0.7...1.0
↑	нет	—
УУ-6.2	ПТК: 37	
	Супесь (2-5 м), ниже галька	
а ^{cp} IV	Условия	
Показатель ЭГУ	естеств.	наруш.
t, °C	-7...-8.5	-5.5...-7
СТС, м	0.8...1.2	0.8...1.4
ρ, г/см ³	1.3...1.45	1.3...1.45
i пжл, %	10	10
W _c ≈i _{вг} , %	60...120	60...120
<i>Процессы, д.е.</i>		
∅	0.7...1.0	0.7...1.0
∠	нет	0.3
⊖	нет	0.3
#	0.5	0.5
..	нет	нет
↑	—	—
2-5	—	—

УУ-6.2	ПТК: 37	
$a_{\text{сп}}^{\text{IV}}$	Супесь (2-5 м), ниже галька	
Показа- тель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
$t, ^\circ\text{C}$	-7...-8.5	-5.5...-8
СТС, м	0.8...1.2	1.0...1.5
$\rho, \text{г}/\text{см}^3$	1.3...1.68	1.3...1.68
i пжл, %	0	0
$W_c \approx i_{\text{вр}}, \%$	40...100	40...100
Процессы, д.е.		
	нет	нет
=	0.7	0.7...1.0
	нет	нет
	нет	нет
	нет	нет
#	0.5	0.3...0.5
	-	-
нет		

У-6.3	ПТК:16, 29, 32, 33,34	
ad,p III ²⁻⁴ -IV	Оторфованный суглинок (5-10 м)	
Показа- тель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
<i>t</i> , °C	-7...-8.5	-5.5...-8
СТС, м	0.4...0.8	0.4...1.4
ρ , г/см ³	1.3...1.48	1.3...1.48
<i>i</i> пжл, %	0	0
<i>W_c</i> ≈ <i>i_{вр}</i> , %	60...160	60...160
Процессы, д.е.		
	0.3	0.5...1.0
=	0.3	0.3...0.5
	нет	0.3
	нет	нет
	нет	0...0.3
#	0.1...0.3	0.1...0.3
	-	-
нет		

НУ-7	ПТК: 11, 14, 16	
d III ²⁻⁴ -IV	Сутлиники (5-10 м)	
Показа- тель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
t, °C	-7.5...-9	-5.5...-7
СТС, м	0.8...1.2	0.8...1.4
ρ, гсм ⁻³	1.3...1.45	1.3...1.45
i _{возд} , %	20	20
W _{снег} , %	60...120	60...120
Процессы, д.е.		
	0.7...1.0	0.7...1.0
=	0...0.3	0...0.3
	нет	0.3
	нет	0.7
	нет	0...0.1
=	0.5	0.5
>3	-	-
6-8	-	-

НУ-8	ПТК: 26, 27, 28	
ad III ²⁻⁴	Супеси (> 20 м)	
Показа- тель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
<i>t</i> , °C	-8...-9	-8...-9
СТС, м	0.6...1.0	0.6...1.0
ρ , г/см ³	1.24...1.8	1.24...1.8
<i>i</i> пжл, %	25	25
<i>W_c</i> ... <i>i_{вр}</i> , %	40...130	40...130
<i>Процессы</i> , д.е.		
	0.3	0.5...1.0
\equiv	нет	нет
\angle	0.1...1.0	0.7...1.0
	нет	0.1...0.3
$\Gamma\Gamma$	0.5...1.0	0.7...1.0
3-5 до 20	-	-

ОНУ-9	ПТК: 17	
ad III ²⁻⁴	Супеси (до 35 м)	
Показа- тель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
<i>t</i> , °C	-8...-9	-6...-7
СТС, м	0.6...1.0	0.8...1.4
<i>ρ</i> , г/см ³	1.24...1.8	1.24...1.8
<i>i</i> пжл, %	35	30...35
<i>W_C</i> ≈ <i>i_{Br}</i> , %	40...130	40...130
<i>Процессы</i> ,		д.е.
⊕	нет	нет
≡	нет	0.1...0.3
∠	нет	0.1
⌚	нет	1.0
⊓	нет	0.3
3-5 до 35	-	-

ОНУ-18	ПТК: 18, 29	
ад	Супеси (20-35 м)	
Показатель ЭГУ	Условия:	
	естеств.	наруш.
$t, ^\circ\text{C}$	-8...-10	-6...-8
СТС, м	0.5...1.0	0.8...1.4
$\rho, \text{гсм}^{-3}$	1.24...1.8	1.24...1.8
$i_{\text{пах}}, \%$	30	25...30
$W_{\text{внеш}}, \%$	40...130	40...130
Процессы, д.е.		
	1.0	0.7...1.0
=	0...0.3	нет
	нет	0.3...0.5
	нет	0.5
	нет	0.3
3-5	-	-
20-35	-	-

Усл. обозн. см. в табл. 1

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ КРУПНОМАСШТАБНЫХ

кого мониторинга территории месторождения и принятия управляющих решений по минимизации экологического ущерба от деятельности предприятия и его инфраструктуры.

Методика допускает использование ГИС-технологий.

Литература

Гарагуля Л.С. Методика прогнозной оценки антропогенных изменений мерзлотных условий. М.; Изд-во МГУ, 1985, 225 с.

Геоэкология Севера (введение в геокриоэкологию) / Под ред. В.И. Соломатина. М.; Изд-во МГУ, 1992, с. 270.

Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных районов. М.; Недра, 1989, 230 с.

Изучение инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны: Методическое руководство / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречишцева, А.В. Павлова. М., Недра, 1992, 288 с.

Мельников Е.С., Москаленко Н.Г., Сташенко А.И. Крупно- и среднемасштабные карты реакции геологической среды криолитозоны на механические нарушения // Геоэко-

логические исследования при инженерно-геологических съемках. М., ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 41—51.

Островский В.Н., Цыпина И.М., Кузьмина Л.Н. Оценка геоэкологического состояния геологической среды при составлении региональных мелкомасштабных геоэкологических карт // Геоэкологические исследования при инженерно-геологических съемках. М.; ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 12—20.

Островский Л.А., Островский В.Н. Сводная легенда и макеты геолого-экологических карт масштаба 1:200 000 — 1:100 000. М., ВСЕГИНГЕО, 1995.

Требования к геолого-экологическим исследованиям и картографированию. Масштаб 1:1 000 000—1:500 000. М., ВСЕГИНГЕО, 1990а, 41 с.

Требования к геолого-экологическим исследованиям и картографированию. Масштаб 1:200 000—1:100 000. М., ВСЕГИНГЕО, 1990б, 86 с.

Требования к геолого-экологическим исследованиям и картографированию. Масштаб 1:50 000—1:25 000. М., ВСЕГИНГЕО, 1990в, 127 с.

Царев П.В. Общие требования к геоэкологическим исследованиям при производстве инженерно-геологических и комплексных съемок // Геоэкологические исследования при инженерно-геологических съемках. М., ВСЕГИНГЕО, 1992, с. 7—12.

*Поступила в редакцию
3 июля 1997 г.*

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 50—53

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 624.139:624.15

**УЧЕТ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ
НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ**

Г. П. Пустовойт

Московский государственный университет, геологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

В Строительных Нормах и Правилах (СНиП) влияние случайных факторов на устойчивость сооружений, возводимых на многолетнемерзлых породах, учитывается коэффициентом надежности. Этот коэффициент вносит в расчет основания некоторый запас прочности, призванный обеспечить его устойчивость вопреки неблагоприятным случайным воздействиям, прежде всего климатическим. Однако степень обеспеченности не может быть оценена при детерминистическом подходе, и коэффициент надежности вычислить невозможно, поэтому он назначается "волновым" параметром, исходя из опыта проектирования. Вероятностный подход дает количественную меру гарантии устойчивости основания — уровень безопасности — и позволяет связать его с коэффициентом надежности, функциональной зависимостью, а значит, и рассчитать коэффициент. В статье предложен метод его расчета, который может быть легко включен в СНиП в качестве дополнения к соответствующему пункту. Метод позволяет учесть и тренды температуры из-за глобальных изменений климата.

Вечномерзлые грунты, надежность, риск, оптимизация, изменения климата

**ACCOUNT OF CLIMATIC CHANGE IN THE DESIGN
OF THE BASES OF STRUCTURES ON PERMAFROST SOILS**

G. P. Pustovoit

Moscow State University, Department Geology, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

In the government design standards (SNiP) permafrost bases of structures tolerance for random factors is described in terms of coefficient of reliability. This coefficient has to provide a safety margin under adverse random effect on the frozen base (the climatic factor first). But it is impossible to evaluate the degree of safety and to calculate the coefficient of reliability, so it is set from the previous design experience. Alternatively, probability approach results in the quantitative characteristic of the degree of safety and gives its functional relationship with the coefficient of reliability, and now we are able to calculate this coefficient. We have worked out calculation procedure which can be added to the design standards. This procedure permits to take into account both random temperature variations and its regular global changes.

Permafrost, reliability, risk, optimization, climatic change

Строительные свойства вечномерзлых грунтов (ВМГ) в значительной степени определяются их температурным режимом, представляющим собой процесс, развивающийся во времени и подверженный случайным воздействиям, поэтому изменения несущей способности и деформации оснований также являются случайными процессами, а их стохастические свойства и фактор времени оказывают решающее влияние на устойчивость зданий и сооружений. Методика расчета оснований по предельным состояниям, нормированная в Строительных Нормах и Правилах (СНиП), создана на основе опыта строительства на талых грунтах и не учитывает названных факторов. Для применения ее к расчес-

там вечномерзлых оснований последние необходимо рассматривать с позиций теории надежности изменяющихся систем, для которых фактор времени принципиально важен и не может быть учтен введением каких-либо единичных коэффициентов, задающих доверительные границы для тех или иных параметров.

Количественное описание надежности дается функцией, значение которой в любой фиксированный момент времени t равно вероятности того, что время безотказной работы системы будет больше t . При этом под безотказностью понимается выполнение условий предельных состояний, чем обеспечивается преемственность вероятностных методов расчета по отношению к

теории предельных состояний и методам расчета по СНиП. Общее определение функции надежности дано в [Хрусталев и др., 1988]. При сохранении вечно-мерзлого состояния грунтов основания (принцип I) распределение числа отказов подчиняется закону Пуассона и функция надежности может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} P(t, \gamma) &= \exp \left\{ - \int_0^t m[\gamma(\tau)] d\tau \right\} = \\ &= \exp [-tm(\gamma)], \end{aligned} \quad (1)$$

где t — время, лет; последнее равенство справедливо при отсутствии глобальных изменений климата, когда $\gamma = \text{const}$; $m(\gamma)$ — математическое ожидание числа отказов за единицу времени; вид этой функции определяется видом распределения и спектральными характеристиками случайногоп теплового процесса в основании и периодической составляющей; для вечно-мерзлых оснований мы нашли эту функцию и привели ее к следующему виду:

$$m(\gamma) = \exp(-\gamma^2/2)/(\gamma \sqrt{2\pi}), \quad (2)$$

где γ — характеристика безопасности — отношение запаса прочности (например, несущая способность минус нагрузка) к среднему квадратическому отклонению этого запаса.

Характеристика безопасности, с одной стороны, полностью определяет надежность системы, с другой — связана простой функциональной зависимостью с коэффициентом надежности. Согласно СНиП этот коэффициент вносит в расчет основания некоторый запас прочности, призванный обеспечить его устойчивость вопреки неблагоприятным случайным воздействиям, прежде всего климатическим. Однако степень обеспеченности не может быть оценена при детерминистическом подходе, и коэффициент надежности вычислить невозможно, поэтому он назначается „волевым“ порядком, исходя из опыта проектирования. В СНиП этот коэффициент „расщепился“ на несколько по-разному называемых и независимо назначаемых коэффициентов. Поэтому в дальнейшем мы будем говорить о коэффициенте запаса, понимая под ним комбинацию всех упомянутых называемых коэффициентов. Связь коэффициента запаса K с характеристикой безопасности дается формулой:

$$K = 1/(1 - V\gamma), \quad (3)$$

где V — коэффициент вариации несущей способности (см. ниже).

Возможность расчета коэффициента запаса как раз и служит тем „разъемом“ (или интерфейсом), через который вероятностные методы легко подключаются к СНиП, так как рассчитанное значение коэффициента запаса просто под-

ставляется в условие предельного состояния, не нарушая принятого порядка расчетов.

Расчет названных величин требует решения трех взаимосвязанных задач: во-первых, дать формальное математическое описание системы „фундамент-основание“ в виде оператора, переводящего входные воздействия на нее в выходную величину — несущую способность, во-вторых, описать стохастическое поведение системы, когда входные и выходные величины являются случайными процессами, в-третьих, в целях практической применимости результатов упростить сложные зависимости, придав им вид расчетных формул, таблиц, графиков.

При решении первой задачи в основу положены расчетные схемы и формулы СНиП, связывающие несущую способность с параметрами теплового режима и прочностными характеристиками ВМГ. Вторая задача решена методами математической теории случайных процессов и их выбросов; при этом учтена сезонная и случайная изменчивость не только несущей способности, но и нагрузок на основание. В результате решения третьей задачи получен представленный здесь метод расчета. Поскольку изменчивость нагрузок играет второстепенную роль и для капитальных зданий может вообще не учитываться, мы опустим соответствующие члены в расчетных формулах, чтобы не отвлекаться от главного.

Расчет коэффициента вариации несущей способности существенно зависит от способа фундаментостроения и типа охлаждающей системы. Здесь мы рассмотрим самый распространенный способ (с сохранением вечно-мерзлого состояния грунтов) и тип системы (вентилируемое подполье). В этом случае имеем:

$$V = \frac{0.9(-T_{m,e}'/A)^{1/3}\sigma W}{-2T_{m,e} - C\sqrt{-T_{m,e}}}, \quad (4)$$

где $T_{m,e}$, $T_{m,e}'$ — расчетные температуры ВМГ, определяемые по указаниям СНиП; σ , A — среднее квадратическое отклонение среднегодовой температуры воздуха и амплитуда ее сезонных колебаний; W — коэффициент затухания случайных колебаний температуры с глубиной, представленный в виде таблицы; C — коэффициент, зависящий от типа фундамента и от вида грунта, представленный в виде таблицы.

Как найти вторую величину, входящую в выражение (3) — характеристику безопасности? Мерой устойчивости сооружения служит уровень надежности — значение функции надежности в конце нормативного срока эксплуатации сооружения (т. е. вероятность безотказной работы в течение всего этого срока). Более наглядный показатель — уровень риска — дополнение уровня надежности до единицы, т. е. вероятность

отказа. Каким должен быть этот уровень? Для сооружений с высокой степенью ответственности (с моральной ответственностью) он может быть задан (нормирован) как исходный параметр. В этом случае характеристика безопасности определяется из выражений (1) и (2). В общем же случае ее следует определять из решения оптимизационной задачи, где минимизация подлежат суммарные приведенные затраты на строительство и эксплуатацию сооружения, включая цену риска, которая выражается через функцию надежности. Формула для расчета оптимального значения характеристики безопасности приводится к виду:

$$\gamma_0 = \sqrt{2 \ln [(5 - 65/t_e)/EV]} - 2V, \quad (5)$$

где t_e — длительность срока эксплуатации, лет; E — обобщенный экономический коэффициент, определяемый как отношение удельной стоимости создания несущей способности (цена 1 ньютона) к стоимости сооружения, приходящейся на единицу его веса.

Подставляя значение (5) в выражение (3), получаем оптимальное значение коэффициента запаса. Как видим, оно зависит от очень многих факторов: климатических, грунтовых, от назначения и стоимости сооружения и длительности его эксплуатации, типа и глубины заложения фундаментов, стоимости производства работ. Выявляется и характер основных зависимостей.

Так, с ростом стоимости сооружения и длительности эксплуатации, согласно (5) и (1), растет оптимальный уровень надежности, а вместе с ним и коэффициент запаса. То есть для более дорогостоящего сооружения, возводимого на более длительный срок, экономически выгоден больший запас прочности, обеспечивающий более высокую надежность (например, в условиях Воркуты при прочих равных: для 12-этажного жилого здания $K = 1,8$, для 5-этажного — 1,6, для временного со сроком эксплуатации 20 лет — 1,4). Это вполне понятно, как и то, что в более холодных и стабильных климатических условиях оптимальный коэффициент запаса оказывается меньше (при прочих равных условиях 1,6 для Воркуты и 1,3 для Якутска).

Не столь очевидна зависимость от глубины заложения фундамента. С глубиной все колебания температуры затухают и коэффициент вариации V убывает, а значит возрастает оптимальное значение характеристики безопасности (и, конечно же, уровень надежности), но темп этого роста ниже, чем темп снижения коэффициента V , поэтому согласно (3) оптимальный коэффициент запаса снижается. Это можно проиллюстрировать следующим примером, рассчитанным в условиях Воркуты.

Длина свай, м	6	8	10
Коэффициент запаса	1,9	1,6	1,4
Несущая способность свай, %	62	100	144
Число свай, %	190	100	60
Объем бетона, %	142	100	75
Уровень надежности	0,975	0,985	0,991
Уровень риска	0,025	0,015	0,009

Как видим, с ростом глубины погружения свай сокращаются затраты труда и материалов при одновременном значительном повышении уровня надежности (риск уменьшился почти втрое), тогда как попытка повысить этот уровень путем увеличения числа свай привела бы к росту затрат. Причина в том, что в первом случае коэффициент вариации V уменьшается, во втором — нет. Заметим, что коэффициент V уменьшается и при понижении температуры ВМГ, приводя к тому же эффекту повышения надежности при сокращении затрат (в данном примере охлаждение ВМГ на 1° сокращает расход бетона на 15 % и уменьшает уровень риска почти вдвое).

Итак, экономически целесообразными мерами повышения устойчивости являются охлаждение ВМГ и увеличение глубины заложения фундаментов. Последнее указывает на преимущество свайных фундаментов перед столбчатыми и на целесообразность так проектировать конструкции зданий, предназначенных к строительству по принципу I, чтобы их можно было опирать на фундаменты с возможно меньшим числом элементов, создающих необходимую несущую способность за счет большой глубины погружения в ВМГ.

Предложенный метод расчета позволяет учесть и потепление климата, если оно не „слишком сильное“ (критерий дан ниже). С повышением температуры ВМГ несущая способность основания будет снижаться и в какой-то момент станет равной нагрузке от сооружения (будет „выбран“ весь запас прочности, заложенный в проект коэффициентом K). Этим „критическим“ моментом наиболее вероятного отказа основания определяется средняя долговечность. Критический момент (как и температуру ВМГ в этот момент) можно найти обычным расчетом по СНиП в каждом конкретном случае, задавшись определенным сценарием потепления.

Если критическое время t_c меньше срока эксплуатации сооружения t_e , будем говорить о „сильном“ потеплении; именно такой случай был исследован нами численными методами [Хрусталев и др., 1993]. Для применения к этому случаю аналитического метода расчета требуется его существенная переработка, которая сейчас ведется. Здесь же мы рассмотрим „слабое“ потепление ($t_c > t_e$).

УЧЕТ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ

Как показали расчеты, при линейном тренде температуры воздуха закон изменения характеристики безопасности практически не отличается от линейного:

$$\gamma(t) = (1 - t/t_c)\gamma_0, \quad (6)$$

где индексом „ноль“ обозначено оптимальное значение, рассчитанное без потепления.

Выражения (1), (2) и (6) описывают закон снижения надежности основания из-за глобального потепления и позволяют найти значение характеристики безопасности (а значит, и коэффициента запаса), которое требуется обеспечить в начальный момент. Это значение можно найти из следующего вполне понятного условия: при адекватном учете потепления уровень надежности должен остаться таким же, каким он был без потепления при оптимальном значении (5) характеристики безопасности, т. е.

$$P[t_e, \gamma(t)] = P(t_e, \gamma_0). \quad (7)$$

Подставив сюда (2) и согласно (6), сделав замену $dt = -(t_c/\gamma_0)d\gamma$, получим:

$$t_c \int_{\gamma_T - \gamma_0 t_c / t_c}^{\gamma_T} \exp(-\gamma^2/2)/\gamma d\gamma = t_e \exp(-\gamma_0^2/2), \quad (8)$$

где γ_T — искомое „требуемое“ значение. Замена переменной $\exp(-\gamma^2/2) = u$ приводит подынтегральное выражение к виду $dy/\ln y$, т. е. интеграл (8) сводится к хорошо известной специальной функции — интегральному логарифму, который при малых значениях своего аргумента хорошо приближается функцией $y/\ln y$. После логарифмирования, приведения подобных и отбрас-

ывания малых членов получим начальное значение характеристики безопасности, требуемое в условиях потепления:

$$\gamma_T = \gamma_0 \left[1 + \frac{t_e}{t_c} + 2 \ln \left(1 - \frac{t_e}{t_c} \right) (t_e/t_c)/\gamma_0^2 \right]. \quad (9)$$

Подставив это значение в (3), найдем оптимальный коэффициент запаса, который требуется обеспечить с учетом будущего потепления.

В качестве примера мы рассчитали оптимальные значения коэффициента запаса для жилых зданий (срок эксплуатации 50 лет), возводимых по принципу I в условиях, характерных для района Воркуты, при различном темпе потепления (значения K без потепления взяты из приведенных выше примеров).

Темп потепления, град/г	Коэффициент запаса K для зданий:	
	5-этажного	12-этажного
0	1,6	1,8
0,02	1,8	2,0
0,03	2,0	2,3
0,04	2,2	2,7

Литература

- Хрусталев Л. Н., Пустовойт Г. П. Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1988, 253 с.
 Хрусталев Л. Н., Пустовойт Г. П. Надежность и долговечность оснований инженерных сооружений на вечномерзлых грунтах в условиях глобального потепления климата // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1993, № 3, с. 10—13.

*Поступила в редакцию
30 мая 1997 г.*

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ЛОКАЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Я.Б. Горелик, В.Н. Феклистов, А.Н. Нестеров

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

В соответствии с установленными нами причинами деформации свайных фундаментов (недостаточная глубина погружения и пластично-мерзлое состояние пучинистого грунта) предложен комплекс мероприятий по термостабилизации грунтов оснований этих фундаментов. Комплекс мероприятий включает в первоочередном порядке использование средств по понижению температуры грунта до твердомерзлого состояния (с помощью термосифонов) и последующее за этим применение пенного покрытия по поверхности грунта в пределах контура фундаментов для усиления эффекта остаточного охлаждения.

Выполненные расчеты и последующие наблюдения показали, что предлагаемая схема термостабилизации обеспечивает требуемое значение остаточного охлаждения в пределах $-0,5^{\circ}\text{C}$, что с учетом начальной температуры грунта достаточно для перевода их в твердомерзлое состояние.

Проведенные в 1996 г. наблюдения сразу после зимнего периода охлаждения термосифонами и устройства теплоизоляции в начале летнего сезона показали, что в основании всех свайных кустов накоплены существенные запасы холода и глубина сезонного оттаивания грунта в пределах свайных фундаментов концу лета уменьшилась на 1,5—2 м по сравнению с предыдущим годом. Что позволило снизить активный слой действия сил пучения на фундаменты и на соответствующую величину увеличить длину анкерной части свай.

Наблюдения за поведением термостабилизированных таким образом оснований фундаментов продолжаются.

Мерзлый грунт, свая, термостабилизация, термосифон, пена, теплоизоляционное покрытие

STABILIZATION OF THE PILE BASIS OF THE LOCAL STRUCTURE ON THE FROZEN GROUND

Ya.B. Gorelic, V.N. Feclistov, A.N. Nesterov

Earth's Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia

According to the reasons, of deformation established by us, of the pile bases (insufficient depth of imbedding and plastic-frozen state of the frost heave ground) a complex of measures on thermostabilization of the ground of these bases is offered. The complex of measures includes in the prime order use of tools on lowering temperature of the ground up to hard-frozen state (with the help of thermosyphon) and consequent application of foam cover on the surface of the ground within the limits of outline of the bases for enhancing the effect of residual cooling.

Our calculations and consequent observations have shown that the offered scheme thermostabilization provides the required value of residual cooling within -0.5°C , which in view of initial temperature of the ground is sufficient for changing them into hard-frozen state.

The observations, carried out in 1996, immediately after winter period of cooling by thermosyphon and thermoinsulation devices at the beginning of summer season have shown that in the base of all pile of bushes essential stores of cold are accumulated and the depth of seasonal thawing of the ground within the pile bases to the end of summer decreased by 1,5—2 m in comparison with the previous year. This allowed us to decrease the active layer of operation of frost heave forces on the bases and to increase the anchor length of a part of piles by corresponding value.

The observations of the behavior of thermostabilized ground bases are in progress.

Ground freezing, pile, thermal stabilization, thermosyphon, foam, thermal insulation, cover

ВВЕДЕНИЕ

В ряде случаев при эксплуатации свайных фундаментов локальных сооружений станций радиорелейных линий отмечаются существенные ежегодные деформации. Ликвидация последствий этих деформаций приводит к удорожанию эксплуатации станции и ухудшению качества их работы.

Как правило, такие станции расположены в районах залегания высокотемпературных грунтов, находящихся в пластично-мерзлом состоянии. Сложные инженерно-геологические условия в сочетании с отклонениями от проектных требований при возведении свайных фундамен-

ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

тов привели к практически аварийному их состоянию на данный момент.

Проведенные в период 1995—1996 годов обследование состояния свайных фундаментов на одной из таких станций в 120 км севернее г. Новый Уренгой показало срочную необходимость проведения специальных мероприятий по термостабилизации грунтов оснований с целью предотвращения дальнейшей их деформации. Предварительные результаты по термостабилизации таких фундаментов излагаются в данной работе.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛОЩАДКИ

Станция расположена в 120 км севернее г. Новый Уренгой на водораздельном участке долины р. Пур.

Территория, прилегающая к площадке, бугристая, растительный покров представлен кустарником карликовой бересклета, ягодником, мхом. Поверхность характеризуется близким расположением грунтовых вод, встречаются термокарстовые образования. Поверхность имеет уклон в северном направлении, превышение верхней точки над нижней в пределах площадки составляет примерно 1,2 м. Район расположения площадки относится к зоне несплошного распространения многолетнемерзлых пород [Баулин, 1995]. В пределах площадки моховой покров значительно нарушен, местами покрыт выбуренными породами, строительным мусором. Вблизи кустов свай растительный покров отсутствует, покрыт слоем выбуренных пород. Вблизи свай имеются конусообразные понижения, заполненные водой, дренаж отсутствует.

Лабораторное исследование кернов, отобранных в пределах контура площадки с различных глубин, показало, что грунты основания находятся в пластично-мерзлом состоянии. Их температура на глубине заделки нижнего торца свай не превышает $-0,6^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Таблица 1. Физические характеристики грунтов

Глубина отбора проб, м	Классификация	Объемный вес скелета, кг/м ³	Суммарная влажность, доли ед.	Температура начала замерзания, $^{\circ}\text{C}$
0,75—1,5	Супесь пылеватая	1200	0,35	-0,04
3,5—5	Суглинок	1400	0,31	-0,06

Согласно [СНиП II-18-76, 1997], температура перехода данного типа грунтов в твердомерзлое состояние составляет -1°C .

ХАРАКТЕРИСТИКА ФУНДАМЕНТОВ СООРУЖЕНИЯ

Фундаменты станции представляют собой пять кустов свай, удаленных друг от друга на

расстояние 40—50 м. Один из кустов является центральной опорой мачты, остальные — анкерные фундаменты оттяжек. Куст центральной опоры имеет 6 полых металлических свай, погруженных на глубину от 4 до 6 м. Кусты фундаментов оттяжек имеют по 8 аналогичных свай с фактической глубиной погружения от 3 до 6 м. В пределах каждого куста сваи обвязаны ростверком. Важной особенностью свайных кустов является их относительно малая протяженность в плане 3×3,5 м. Согласно проектной документации предлагалось осуществлять охлаждение грунтов основания путем принудительной циркуляции воздуха через полость свай в зимнее время года в течение всего срока эксплуатации станции, что в действительности не было осуществлено. В результате на протяжении десяти лет эксплуатации станции наблюдались деформации пучения свай фундаментов оттяжек мачты с интенсивностью примерно 30—50 мм/г. Эти деформации носили неравномерный характер, что вызывало заметные изгибы ростверков. Деформации фундаментов центральной опоры визуально не фиксируются, но заметны при инструментальном наблюдении и являются осадками с малой интенсивностью (<1 мм/г).

Причины, вызывающие развитие деформаций фундаментов, заключаются в несоблюдении температурного режима грунтов основания и недопогружения части свай до проектной отметки.

КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ

В соответствии с установленными причинами деформации, разработанный комплекс мероприятий по устранению негативных процессов включал в первоочередном порядке использование средств по понижению температуры грунтов до твердомерзлого состояния и ее стабилизацию на заданном уровне. Принципы такой термостабилизации изложены в монографии [Ершов и др., 1991]. Основным средством для понижения температуры грунтов выбран термосифон сезонного действия, эффективность действия которого в аналогичных ситуациях многократно проверена [Вялов и др., 1979; Таргутян, 1976; Макаров, 1985]. Однако сложность данного конкретного случая заключается в малой протяженности свайных кустов в плане. Как показано [Горелик и др., 1984; Gorellik, 1996], остаточное охлаждение в конце летнего периода в основании площадки с размерами в плане менее чем 12×12 м может оказаться недостаточным для перевода грунтов в твердо-мерзлое состояние. Для усиления эффекта остаточного охлаждения путем предотвращения разогрева грунта с его поверхности в летнее время года использовано пеноное покрытие по его поверх-

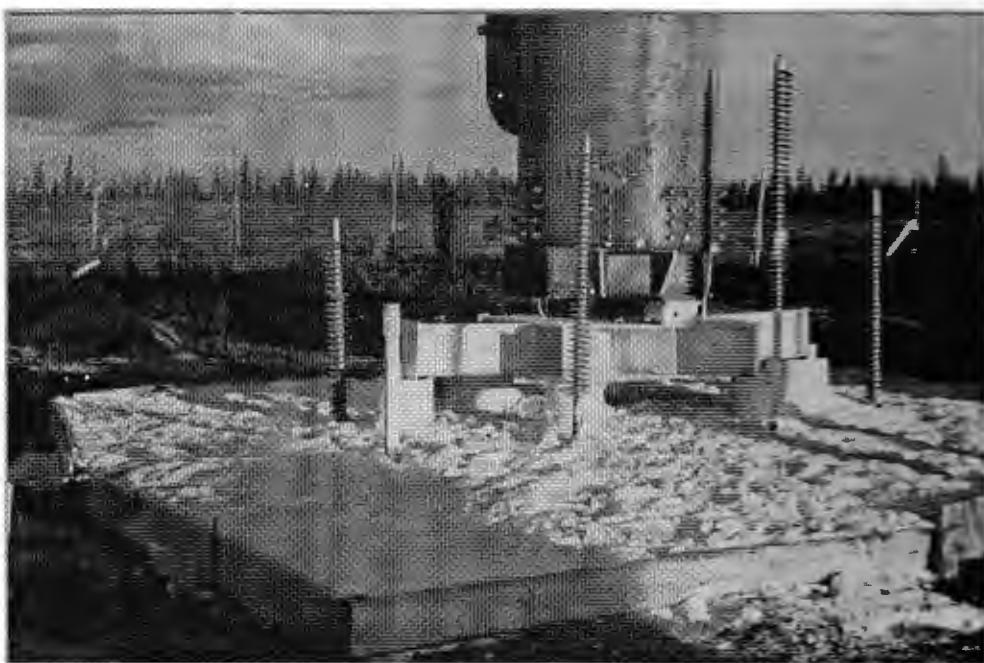


Рис. 1. Общий вид фундамента центральной опоры.

ности в пределах контура фундаментов. Пенное покрытие наносится по грунту в виде жидкой пульпы, которая превращается в твердую пенную массу в течение часа. Эффективность пенной теплоизоляции и ее устойчивость к внешним воздействиям проверена в условиях полигона на полуострове Гыдан [Феклистов и др., 1989; Feklistov et al., 1996].

Пенный экран представляет собой слой полимерной пены на основе карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-МТ. Установка экранов на каждом из свайных оснований осуществлялась с помощью передвижной пеногенерирующей установки. Общая площадь установленных пенных экранов составила 250 м² (по 50 м² на куст).

ПАРАМЕТРЫ СВЕЖЕПОЛУЧЕННОЙ ПЕНЫ

Кратность	10—14
Толщина слоя	20 см
Дисперсность пены	0,1—0,25 мм
Плотность пены	70—100 кг/м ³
Начальная влажность	до 400 вес. %
Плотность пены в воздушно-сухом состоянии	14—20 кг/м ³
Прочность в воздушно-сухом состоянии	до 0,1 мПа
Коэффициент теплопроводности в воздушно-сухом состоянии	0,03 Вт/м·град

Выполненные расчеты температурного режима грунтов показали, что предлагаемая схема термостабилизации должна обеспечить требуемое значение остаточного охлаждения в преде-

лах $-0,5^{\circ}\text{C}$, что с учетом начальной температуры грунтов достаточно для перевода их в твердомерзлое состояние. Конструктивное исполнение системы термостабилизации включает парожидкостные термосифоны диаметром 57 мм в количестве 1 термосифон на каждую несущую сваю и пенный термоизолирующий экран по поверхности грунта с выходом за пределы контура фундамента 1,5 м и толщиной 0,2 м. Термосифоны установлены в сентябре 1995 г., а пенный экран — в начале июня 1996 г. Общий вид исполнения конструктивных мероприятий показан на фотографиях (рис. 1, 2).

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И ДЕФОРМАЦИЙ ФУНДАМЕНТОВ

Инструментальные наблюдения на фундаментах станции проводились 4 раза: в начале и

Таблица 2. Результаты измерений деформации свай

Дата изме-рения	Изменение положения меток Δh (мм) для свай в кусте по отношению к предыдущему положению								
	Δh_1^2	Δh_1^8	Δh_2^2	Δh_2^8	Δh_3^2	Δh_3^8	Δh_4^2	Δh_4^8	
24.09.95	-40	-1	+4	+13	+4	+4	-15	-4	-1
23.06.96	+18	+21	+63	+66	+13	+15	+32	+53	0
21.09.96	+4	+2	+6	+6	-4	+2	-2	+1	0

Примечание. Верхний индекс обозначает номер свай, нижний — номер куста; знак „—“ соответствует осадке, знак „+“ — подъему свай относительно начального положения; начальное положение меток соответствует измерению на 25.06.95.



Рис. 2. Общий вид фундамента оттяжек.

конце летнего периода в 1995—1996 гг. Поскольку проектные температурные скважины оказались забиты льдом, измерение температуры производилось в полостях наиболее глубоких свай. Вновь оборудованные температурные скважины в количестве 2 шт. были установлены в сентябре 1995 г., а измерения в них выполнены только в 1996 г. Одна из них установлена в зоне действия термоколонки на расстоянии 0,5 м от нее, вторая — вне зоны их влияния на расстоянии 15 м от ближайшего куста. Динамика температуры в основании одного из кустов фундаментов оттяжек и центральной опоры показана на рис. 3, 4.

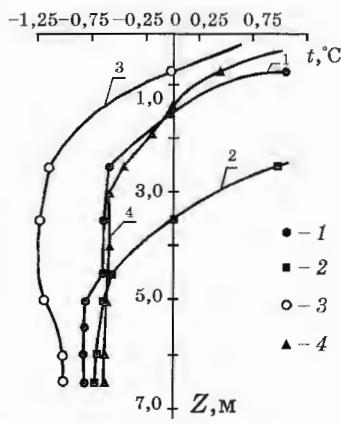


Рис. 3. Динамика температуры в основании свайных фундаментов оттяжек мачты. Куст № 1, свая № 8.

1 — 25.06.95; 2 — 25.09.95; 3 — 25.06.96; 4 — 22.09.96.

Результаты измерения температуры в термоскважинах приведены на рис. 5.

Динамика изменения глубины слоя сезонного оттаивания в плане кустовых площадок показаны на рис. 6. Приведенные на этих рисунках результаты характерны для всех свайных кустов площадки станции.

Данные по измерению деформаций свай в фундаментах приведены в табл. 2.

ВЫВОДЫ

На основании представленных данных можно сделать следующие выводы: к концу зимнего

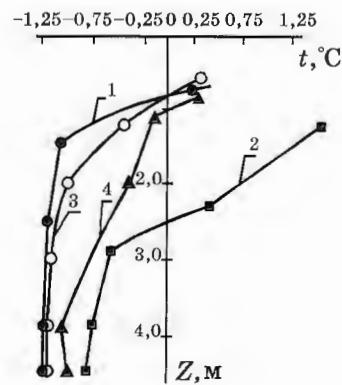


Рис. 4. Динамика температуры в основании фундаментов центральной опоры, свая № 5.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

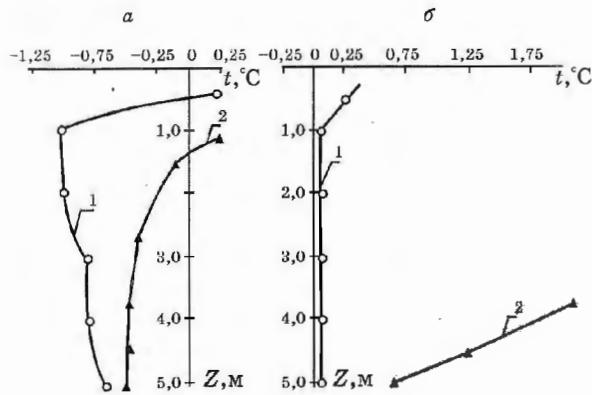


Рис. 5. Динамика температуры в термоскавжинах: а — в зоне влияния термоколонок; б — вне зоны влияния термоколонок.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

периода 1995—1996 гг. в основании всех свайных кустов накоплены существенные запасы холода. Средняя по глубине ниже оттаявшего слоя температура грунтов составляет $-0,75$ — $-1,0$ °C, что приближается к температуре перехода в твердомерзлое состояние. С учетом замерзания шлама, попавшего в скважины при установке термоколонок, этот эффект является вполне удовлетворительным; температура в контрольной термоскавжине, находящейся вне зоны влияния термоколонок, за зимний период не опускалась ниже 0 °C. Это означает, что на площадке станции происходят отепляющие процессы, влияние которых невозможно было бы избежать без выполненных технических мероприятий; к концу летнего периода 1996 г. средняя по глубине ниже слоя сезонного оттаивания температура грунтов составила минус 0,5 °C. Выше отметки 3,5 м, по-видимому впервые за последние несколько лет, образовался слой мерзлого грунта мощностью 1,5—2 м. Это существенно увеличило длину анкерной части свай; глубина сезона оттаивания грунта в пределах кустов к концу лета 1996 г. снизилась на 1,5—2 м по сравнению с предшествующим годом. Соответственно снизился активный слой действия сил пучения на фундаменты; существенные деформации пучения зафиксированы на конец зимы 1996 г. С нашей точки зрения, они являются естественным следствием активной работы термоколонок, работающих в течение первой зимы, в первую очередь, на замораживание шлама и лишь последние ее месяцы — на охлаждение основания. Как отмечено выше, большая часть поверхности свай в период интенсивного промерзания деятельного слоя находилась в талом грунте, несущая способность которого минимальна. Вследствие этого анкерные силы не могут скомпенсировать силы пучения, развивающиеся по боковой поверхности в слое сезонного промерз-

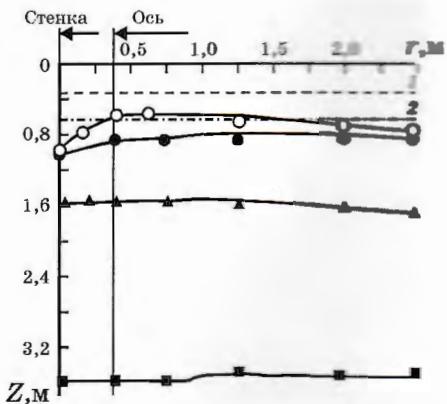


Рис. 6. Глубина сезонного оттаивания на площадке фундамента оттяжек мачты.

Тундра, ненарушенный участок: 5 — 25.06.95; 6 — 25.09.95. Остальные усл. обозн. см. на рис. 3.

зания, что вызывает нарушение устойчивости фундаментов на действие сил трения в первый год работы термоколонок. Вместе с тем выполненные расчеты на устойчивость фундаментов с учетом накопленного в основании холода показывают, что условие устойчивости должно быть выполнено в течение зимы 1997 г.

Наблюдения за состоянием фундаментов станции будут продолжены в июне и сентябре 1997 г.

Литература

- Баулин В.В. Многолетние породы нефтегазоносных районов СССР. М., Недра, 1995, 176 с.
- СНиП II-18-76. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1977, 48 с.
- Ершов Э.Д., Хрусталев Л.Н., Дубиков Г.И., Тармузин С.Ю. Инженерная геокриология. М., Недра, 1991, 439 с.
- Вялов С.С., Александров Ю.А., Миренбург Ю.С., Федосеев Ю.Г. Искусственное охлаждение грунтов с помощью термосвай // Инженерное мерзлотоведение, М., Наука, 1979, с. 72—91.
- Таргулян Ю.О. Устройство свайных фундаментов в вечномерзлых грунтах. Л., Стройиздат, 1978, 157 с.
- Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск, Наука, 1985, 169 с.
- Горелик Я.Б., Измайлова И.Г. Предпостроечное охлаждение грунтов с применением термосвай // Проблемы нефти и газа Тюмени. Тюмень, ЗапСибНИГИИ, вып. 61, 1984, с. 75—88.
- Gorelik J.B. Prognosis method of interaction engineer constructions with permafrost // Proc. of Int. Symp. Building in Gold Regions, China, Charbin, 1996, p. 10—16.
- Феклистов В.Н., Русаков Н.Л., Абдушев И.А., Котлов С.Б. Тепловая рекультивация многолетнемерзлых грунтов пенным экраном в условиях Арктического Севера // Тр. Междунар. симп. „Геокриологические исследования в Арктических районах“. Тюмень, 1989, вып.3, ч. 1, с. 51—58.
- Feklistov V.N., Rusakov N.L. Application of foam insulation to remediation of degraded permafrost // J.Cold Reg. Scie. & Tech., 1996, vol. 24, p. 205—212.

Поступила в редакцию
15 июня 1997 г.

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

А. А. Каган, Н. Ф. Кривоногова

АО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21, Россия

Рассматриваются принципы оценки надежности оснований сооружений, возводимых в криолитозоне, а также самих сооружений. Приводятся зависимости, описывающие условия надежности по прочности, деформируемости, водопроницаемости.

Надежность, многолетнемерзлые грунты, предельные величины, основание сооружения, принцип строительства на многолетнемерзлых грунтах

RELIABILITY OF THE BASEMENT OF STRUCTURES IN CRYOLITOZONE

А. А. Каган, Н. Ф. Кривоногова

The B. E. Vedeneev VNIIG, Inc., 195220, St.Petersburg, Gzhatskaya st., 21, Russia

Principles of estimation of structures basement reliability and structures in cryolithozone are considered. Relationships describing conditions of reliability on strength, deformability and permeability are given.

Reliability, permafrost, limiting value, basement of a structure, principles of building on permanently frozen grounds

Повышение требований к качеству строительства и пристальное внимание к вопросам экологии, возникающим при строительстве и эксплуатации различных сооружений, выдвинуло в число важнейших проблем оценку надежности сооружений.

Как известно (ГОСТ 27.002-89), под надежностью объекта понимается его способность выполнять заданные функции в течение заданного срока службы.

В свою очередь надежность определяет, хотя и не полностью, безопасность объекта. Безопасность — это надежность сооружения по отношению к жизни и здоровью людей, состоянию окружающей среды и т. п. [ГОСТ 27.002-89, 1989].

В настоящее время основное внимание уделяется надежности сооружений, а не их оснований. При этом используются существующие методики предельных состояний при вероятностной трактовке исходных параметров (показателей свойств грунтов, материалов, характеристики нагрузок, воздействий и т. д.) и результаты расчетов. При учете времени прибегают к теории случайных процессов и полей, что требует несравненно большего объема исходной информации [Степанович и др., 1991].

Условие непревышения предельного состояния записывается в виде:

$$F(|A| - |B|) \geq 0, \quad (1)$$

где A — значение фактора, определяющего надежность сооружения; B — предельные для данного сооружения значения того же фактора.

Надежность определяется выражением:

$$H = P[F(|A| - |B|) \geq 0], \quad (2)$$

где $P[F(|A| - |B|) \geq 0]$ — вероятность ненаступления предельного состояния.

Переходя к оценке надежности оснований, следует отметить, что среди обуславливающих ее факторов основными являются: геологическое строение, характер и степень трещиноватости для скальных грунтов, гидрогеологические условия, состав и свойства грунтов, геодинамические процессы, в том числе, сейсмичность, а для многолетнемерзлых грунтов, кроме того, температурный режим и его динамика, криогенное строение, положение, размеры, форма ареалов протаивания, криогеодинамические процессы — термокарст, пучение и т. д.

Работа основания и его надежность в общем случае оценивается показателями прочности, деформируемости и водопроницаемости, которые должны быть получены в условиях, моделирующих нагрузки и воздействия от сооружения.

Надежность основания обеспечивается при определенных значениях указанных характе-

ристик в расчетной области, определяющей работу сооружения, т. е.

$$(E - E^{\text{пр}}) \geq 0, \quad (3)$$

$$(\tau - \tau^{\text{пр}}) \geq 0, \quad (4)$$

$$(K_{\phi} - K_{\phi}^{\text{пр}}) \leq 0, \quad (5)$$

где E , τ , K_{ϕ} — соответственно параметры деформируемости, прочности и водопроницаемости; индекс „пр“ указывает предельную величину, при которой обеспечивается надежность. Предполагая, что указанные характеристики подчинены нормальному закону распределения случайных величин получаем:

$$H_E = \Phi \left[\frac{E(E) - E^{\text{пр}}}{\sigma(E)} \right] \geq 0, \quad (6)$$

$$H_{\tau} = \Phi \left[\frac{E(\tau) - \tau^{\text{пр}}}{\sigma(\tau)} \right] \geq 0, \quad (7)$$

$$H_{K_{\phi}} = \Phi \left[\frac{E(K_{\phi}) - K_{\phi}^{\text{пр}}}{\sigma(K_{\phi})} \right] \leq 0, \quad (8)$$

где $\Phi [\cdot]$ — табулированная функция нормального распределения (функция Лапласа); $E(\cdot)$, $\sigma(\cdot)$ — математическое ожидание и стандарт соответствующего показателя.

В зависимости от вида, типа сооружения и конкретных инженерно-геологических условий для обеспечения надежности требуется либо совместное выполнение условий (3)–(5), либо некоторых из них.

Например, для низконапорной плотины на скальном основании достаточно выполнения условия (5), в то время как для высоконапорной плотины на любом основании необходимо соблюдение всех условий.

Для оснований, представленных многолетнемерзлыми грунтами, при осуществлении I принципа строительства обобщенной характеристикой свойств оснований является температура грунта, поскольку определенным значениям температуры соответствуют определенные значения показателей механических и фильтрационных свойств грунтов. Поэтому, принимая, что значения температуры подчиняются нормальному закону распределения случайных величин, надежность определяется выражением:

$$H = \Phi \left[\frac{t^{\text{пр}} - E(t)}{\sigma(t)} \right] \leq 0, \quad (9)$$

где t — температура грунта основания; $t^{\text{пр}}$ — температура грунта основания, выше которой не обеспечивается надежность основания; $E(t)$, $\sigma(t)$ — математическое ожидание и стандарт t ; Φ — функция Лапласа.

При строительстве по II принципу до начала протаивания для обеспечения надежности основания требуется выполнение условия (9). С повышением температуры надежность основания

может сохраняться или снижаться во времени. Во многих случаях минимальная надежность характерна для оснований в период протаивания из-за возникающей, в частности, неравномерности свойств грунта в разных точках основания. После протаивания надежность, по отношению к состоянию протаивания, как правило, возрастает. Таким образом, при оценке надежности притаивающих оснований необходимо использовать зависимости (3)–(5) для различных состояний основания.

Одним из самых опасных криогеодинамических явлений в основаниях, способным привести к авариям сооружений, является термокарст. Возникновение и интенсификация термокарста возможны при наличии в области теплового влияния сооружения сильнольдистых грунтов или мономинеральных тел подземного льда. Отсюда вытекает, что критериями для оценки надежности оснований по отношению к термокарсту могут служить льдистость грунтов и их температура. Критические значения льдистости для различных грунтов определяются расчетом.

В основаниях крупных и достаточно протяженных сооружений (линейных, промышленных, гидротехнических) имеются области или зоны, в пределах которых наиболее часто происходят процессы, вызывающие нарушения нормального функционирования сооружения и его основания (например, примыкания грунтовых плотин к берегам, бетонным сооружениям, стыки трубопроводов, вводы сетей тепло-водоснабжения и др.) и тем самым нарушающие их надежность.

Следовательно, надежность основания оценивается прежде всего через надежность таких зон.

В связи с особой динамичностью состояния оснований в криолитозоне их надежность изменяется во времени весьма существенно. Для периодической оценки, а в необходимых случаях и для восстановления требуемого уровня надежности оснований и сооружений, особую значимость приобретает организация и проведение мониторинга систем сооружение—основание, начиная с периода инженерных изысканий, до окончания срока службы сооружения и рекультивации земель.

В процессе мониторинга мерзлых оснований фиксируется непосредственно критерийный параметр — температура, и поэтому оценка надежности производится как показано выше.

На оттаивающих основаниях наблюдаемые при мониторинге деформации, смещения, фильтрационные расходы и др. могут свидетельствовать об изменении надежности. Для суждения о снижении надежности основания необходимо сопоставить данные мониторинга с результатами расчетов оснований. Если обнаружится, что пре-

НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

вышены допустимые пределы деформаций, перемещений, фильтрационных потерь, то для оценки надежности следует определить показатели деформируемости, прочности, водопроницаемости, соответствующие наблюдаемому состоянию основания.

Поставленная задача может быть решена, если принять постулат: не обеспечивается надежность основания — не обеспечивается и надежность сооружения. Для обеспечения надежности сооружения необходимо, чтобы:

$$P(S_{\text{пп}} - S) \geq 0, \quad (10)$$

$$P(K_3 - 1) \geq 0, \quad (11)$$

$$P(Q_{\text{пп}} - Q) \leq 0, \quad (12)$$

где $S_{\text{пп}}$ — осадка, предельная для данного сооружения; S — расчетная (натурная) осадка на определенный момент времени; K_3 — коэффициент запаса, обеспечивающий устойчивость основания, откоса, склона и др. на определенный момент времени; $Q_{\text{пп}}$ — предельно допустимый расход фильтрации, Q — расчетный (натурный) расход на определенный момент времени.

Все величины, входящие в выражения (10)–(12), легко рассчитываются по известным

зависимостям с использованием характеристик прочности, деформируемости, водопроницаемости грунтов. В первом приближении можно считать, что только указанные характеристики являются случайными величинами. Однако надо иметь ввиду, что результаты вычислений зависят от принятой схемы расчета.

При строительстве сооружений в криолитозоне по I принципу находятся перечисленные показатели в спектре прогнозируемых значений отрицательной температуры, и выбирается такое ее значение, при котором обеспечивается надежность основания.

Таким образом, и в этом случае значение температуры остается критериальной характеристикой надежности.

Литература

ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. М., 1989.

Степанович Д. В., Шульман С. Г. Проблемы надежности гидroteхнических сооружений. С.-Пб., ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1991, 51 с.

Поступила в редакцию
25 июля 1997 г.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ КОНВЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Г. П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения СО РАН им. акад. П. И. Мельникова, 677018, г. Якутск, Россия

Рассмотрены особенности работы воздушных охлаждающих устройств конвективного действия — термосифонов известной и предлагаемой конструкций. Показаны факторы, определяющие льдообразование в коаксиальных термосифонах. Выявлены условия, при которых зарастание каналов термосифонов льдом не происходит или происходит через определенное время их работы. Получены расчетные зависимости между поперечными размерами каналов термосифонов, параметрами процессов льдообразования и сублимации льда и продолжительностью полной закупорки термосифонов льдом. Приводятся результаты экспериментальных исследований льдообразования и сублимации льда в термосифоне.

Воздушный термосифон, расчет, сублимация льда, льдообразование

IMPROVEMENT OF THE RELIABILITY OF AIR CONVECTION TYPE REFRIGERATION UNITS

G. P. Kuzmin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia

Peculiarities of the work of air convection type refrigeration units — thermosiphons of the known and proposed design have been discussed. Factors which predetermine ice formation in coaxial thermosiphons are shown. The conditions have been established under which ice sublimation in channels of thermosiphon does not occur, or occurs some time later during their operation. Calculated relationships have been obtained between the lateral sizes of thermosiphon channels, parameters of the ice formation and ice sublimation processes and the duration of complete plugging of thermosiphons with ice. The results of experimental studies of ice formation and ice sublimation in thermosiphon are given.

Air thermosiphon, ice formation, ice sublimation, calculation

ВВЕДЕНИЕ

Теплообменные устройства с естественной циркуляцией теплоносителя (термосифоны) используются для управления температурным режимом грунтов в фундаментостроении и гидротехнике. Воздушные термосифоны вследствие низкой надежности практически не нашли применения. В летнее время на холодных стенках каналов воздушного термосифона образуется лед, который может вызвать его закупорку.

С целью повышения надежности работы воздушных термосифонов выполнены теоретические и экспериментальные исследования льдообразования и сублимации льда.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Движение воздуха в термосифонах происходит за счет разности давлений столбов воздуха в двух сообщающихся каналах, возникающей в результате радиального притока или отвода тепла, и разности ветрового разрежения наружного

воздуха у входа и выхода каналов, расположенных на разной высоте от поверхности земли. Циркуляционное движение воздуха в термосифоне обусловлено в холодное время года в основном первым фактором, а в теплое время года — вторым. Движение теплого воздуха в термосифонах приводит к конденсации влаги и намерзанию ее на стенах канала.

В известном коаксиальном термосифоне с возвышающейся внутренней трубой (рис. 1) в летнее время движение воздуха происходит вниз по кольцевому межтрубному пространству и вверх по внутренней трубе. При таком направлении движения воздуха наибольшее количество конденсационного льда образуется в узком кольцевом канале.

В открытых каналах термосифонов лед замерзает также в результате попадания в них дождевых капель.

В настоящее время нет методов оценки льдообразования в воздушных термосифонах.

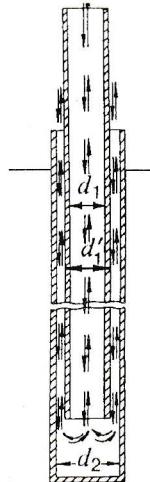


Рис. 1. Воздушные термосифоны известной конструкции.

На основании изложенного, повышение надежности работы воздушных термосифонов может быть достигнуто за счет: 1) обеспечения летнего движения нисходящего потока воздуха по каналу с большим поперечным размером, т. е. по внутренней трубе; 2) снижения общего количества льда, образующегося на стенках канала; 3) установления зависимости между размерами каналов термосифонов, сроком их работы и параметрами льдообразования и сублимации льда.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач рассмотрены особенности льдообразования и сублимации льда в воздушных коаксиальных термосифонах и проведены экспериментальные исследования этих процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработана новая конструкция воздушного термосифона (рис. 2), состоящего из внутренней (1), наружной (2) и вытяжной (3) труб. Верхние концы внутренней и наружной труб располагаются на одном уровне, а пространство между ними закрывается. Межтрубное пространство соединяется с вытяжной трубой через окно, вырезанное на стенке наружной трубы. В таком термосифоне воздух движется всегда в направлении внутренней трубы — межтрубное пространство — вытяжная труба. В летнее время движение происходит за счет различной скорости ветра у концов внутренней и вытяжной труб, расположенных на разной высоте. Лед образуется на стенках внутренней трубы, диаметр которой

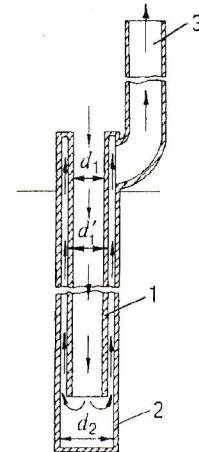


Рис. 2. Воздушные термосифоны новой конструкции.

значительно превышает ширину кольцевой щели.

Условия, при которых каналы термосифона полностью не закупориваются льдом, можно записать в виде:

$$\text{при } \xi_a \leq \xi_c, \quad L > 2\xi_a, \quad (1)$$

$$\text{при } \xi_a > \xi_c, \quad L \geq 2(\xi_a - \xi_c)(\tau - 1) + 2\xi_a, \quad (2)$$

где ξ_a — толщина льда, намерзаемого в теплое время года; ξ_c — толщина льда, испаряющегося в холодное время года; L — поперечный размер канала, в котором образуется лед; τ — число лет полного зарастания канала льдом, начиная с летнего периода.

Поперечный размер канала, в котором образуется лед:

в термосифоне известной конструкции

$$L = \frac{d_1}{2} \frac{1-j}{ij}, \quad (3)$$

в термосифоне новой конструкции

$$L = d_1, \quad (4)$$

где d_1 — внутренний диаметр внутренней трубы; $i = d_1/d_1^1$ — относительный размер толщины стенки внутренней трубы; $j = d_1^1/d_2$ — относительный размер кольцевого канала; d_1^1 — внешний диаметр внутренней трубы; d_2 — внутренний диаметр наружной трубы.

Подставив (3) и (4) в (1) и (2), получим зависимости для определения минимально допускаемых размеров термосифонов:

известной конструкции

$$\text{при } \xi_a \leq \xi_c, \quad d_1 > \frac{4\xi_a ij}{1-j}, \quad (5)$$

при $\xi_a > \xi_c$, $d_1 \geq 4 [(\xi_a - \xi_c)(\tau - 1) + \xi_a] \frac{ij}{1-j}$; (6)

новой конструкции

$$\text{при } \xi_a \leq \xi_c, \quad d_1 > 2\xi_a, \quad (7)$$

$$\text{при } \xi_a > \xi_c, \quad d_1 \geq 2 [(\xi_a - \xi_c)(\tau - 1) + \xi_a]. \quad (8)$$

Отношение минимально допускаемых диаметров d_1 термосифонов известной и новой конструкции равно

$$k = \frac{2ij}{1-j}. \quad (9)$$

При $i = 0,9$; $j = 0,76$; $k = 5,7$, т. е. для обеспечения самоочистки от льда поперечные размеры термосифона известной конструкции должны быть в 5,7 раза больше поперечных размеров термосифона новой конструкции.

Для определения величин ξ_a и ξ_c в условиях Якутска были выполнены натурные эксперименты. Экспериментальные определения ξ_a проводились в термосифоне с тремя разными устройствами, снижающими возможность закупорки его льдом: 1) схема 1 — термосифон новой конструкции, в котором возможность его закупорки льдом уменьшена путем обеспечения льдообразования в канале с большим поперечным размером; 2) схема 2 — то же, но с устройством для уменьшения летней циркуляции воздуха в виде четырех окон, прорезанных в верхней части внутренней трубы, через которые теплый воздух проходит из внутренней трубы в вытяжную; 3) схема 3 — то же, но с козырьком над внутренней трубой, предотвращающим попадание в нее дождевых капель.

Основные размеры термосифонов: $d_1 = 96$ мм; $d_2 = 159$ мм; $h = 16,0$ м.

В конце теплого периода года определяли количество намерзшего льда V , длину l и максимальную толщину ξ_a ледяного покрытия:

Параметры ледяного покрытия	Схема 1	Схема 2	Схема 3
Общий объем (V), л	12,0	3,0	1,0
Длина (l), м	12,0	3,0	0,3
Толщина (ξ_a), мм	20,0	40,0	10,0

Сравнивая между собой все три схемы, можно записать

$$V_1 : V_2 : V_3 = 12 : 3 : 1$$

$$l_1 : l_2 : l_3 = 40 : 10 : 1$$

$$\xi_a^1 : \xi_a^2 : \xi_a^3 = 2 : 4 : 1.$$

Устройство окон на стенке внутренней трубы термосифона (схема 2) уменьшило общее количество льда в 4 раза. Однако при этом максимальная толщина льда в 2 раза увеличилась. Это вызвано, по-видимому, снижением или

отсутствием движения воздуха во внутренней трубе ниже окон. Наилучшие условия создаются при схеме 3. В экспериментах в 12 раз уменьшился объем льда и в 2 раза толщина льда.

Исследования сублимации льда в термосифонах были проведены в конце февраля — начале марта в течение 720 ч. Температура воздуха колебалась в пределах минус 20 ... 30 °С. Образцы льда массой около 500 г помещались в начале нисходящего и в конце восходящего потоков термосифона. В процессе эксперимента периодически определяли изменения массы и размеров образцов. По этим данным рассчитывали интенсивность сублимации льда, средние значения которой составили в начале нисходящего потока $J_1 = 0,6 \cdot 10^{-2}$ мм/ч, в конце восходящего потока $J_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ мм/ч.

Суммарную величину испаряющегося слоя льда в нисходящем потоке приближенно можно определить по формуле

$$\xi_c = J_1 \tau_c, \quad (10)$$

где τ_c — продолжительность функционирования термосифона в холодное время года.

В Якутске $\tau_c = 4680$ ч и $\xi_c = 0,6 \cdot 10^{-2} \cdot 4680 = 28,1$ мм. При $\xi_a \leq \xi_c$, $i = 0,9$, $j = 0,76$ определим минимальные поперечные размеры термосифонов:

известной конструкции по формуле (5)

$$d_1 > \frac{4 \cdot 20 \cdot 0,9 \cdot 0,76}{1 - 0,76} = 228 \text{ мм};$$

новой конструкции по формуле (7)

с устройством по схеме 1 $d_1 > 2 \cdot 20 = 40$ мм;

с устройством по схеме 3 $d_1 > 2 \cdot 10 = 20$ мм.

Для термосифона новой конструкции с устройством по схеме 2, когда $\xi_a > \xi_c$, определим минимальный диаметр внутренней трубы при $t = 3$ года по формуле (8)

$$d_1 = 2[(40 - 28,1)(3 - 1) + 40] = 127,6 \text{ мм}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В термосифоне новой конструкции путем обеспечения циркуляции воздуха в определенном направлении достигнуто льдообразование в канале с большим поперечным размером. Кроме того, восходящий поток холодного воздуха по кольцевой щели обеспечивает более равномерное охлаждение грунта по высоте термосифона и более эффективный отвод тепла, чем нисходящий поток холодного воздуха по кольцевой щели в термосифоне известной конструкции. Дополнительные устройства по уменьшению летней циркуляции воздуха и исключению попадания

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ

дания атмосферных осадков в термосифоне новой конструкции позволили снизить общее количество и толщину намерзаемого льда.

Полученные зависимости минимальных размеров каналов воздушных термосифонов от срока их службы и параметров льдообразования и сублимации льда в них являются основой для проектирования надежно работающих охлаждающих устройств.

Воздушные термосифоны новой конструкции впервые применены для создания мерзлотной завесы в Жатайской водохранилищной грунтовой плотине и замораживания воды в подземных резервуарах геокриогенных охлаждающих устройств.

*Поступила в редакцию
12 июля 1997 г.*

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ НИЗКОГО НАПОРА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Р.В. Чжан

Институт мерзлотоведения СО РАН им. акад. П.И. Мельникова,
677018, Якутск, Институт мерзлотоведения, Россия

Наряду с общизвестными причинами деформаций грунтовых плотин (сложные геокриологические условия створов, суровый климат, сложные условия строительства и эксплуатации) вскрыты и исследованы специфические виды деформаций сооружений. К ним относятся поперечные морозобойные трещины и полигональные трещины усыхания, которые в ряде случаев являются начальными для развития морозобойных; трещины отслоения грунта от стенок устоев водосбросов. Зафиксированы микроструктурные преобразования грунтовых частиц, изменение гранулометрического состава, плотности упаковки и влажности. Вскрыт механизм отслоения грунта от конструкций водосбросов и измерены в натурных условиях на действующем сооружении величины перемещения грунтовых частиц, а также давление, которое они оказывают на стены устоев.

Плотина, водосброс, мерзлый грунт, деформация, влажность, температура

DEFORMATION OF EARTH-FILLED DAMS AND LOW-PRESSURE SPILLWAYS IN THE PERMAFROST AREA

R.V. Zhang

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 677018, Yakutsk, Russia

Along with well-known reasons of deformations of earth-filled dams (complicated geocryological conditions of sections, severe climate, complicated conditions of construction and operation), specific types of deformation of structures have been revealed and studied. These are cross frost cracks and polygonal cracks of drying which in a number of cases initiate the development of frost cracks; cracks of the soil rending from the abutment walls of spillways. Microstructural transformations of the ground particles have been marked as well as changes in granulometric composition, packing density and moisture content. Mechanism of the soil rending from the structures of spillways has been revealed and the magnitude of soil particles movement has been measured under natural conditions on the acting structure as well as the pressure the particles produce on the abutment walls.

Dam, spillway, permafrost, deformation, moisture content, temperature

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации гидротехнических сооружений водохозяйственного и гидромелиоративного назначения в области распространения многолетнемерзлых грунтов свидетельствует о том, что вопрос обеспечения их устойчивости стоит остро и в настоящее время.

Причины и виды деформаций гидротехнических сооружений описаны и исследованы рядом авторов [Тимофеичук, 1960; Хомзе, 1966; Чжан, 1972; Биянов, 1975; Чжан, 1980]. Разрушающие деформации связаны с недостаточным объемом инженерных изысканий, обусловленных малыми средствами финансирования; отсутствием нормативной базы для этого класса сооружений, позволяющей принять правильные конструктивные решения, которые бы в наиболь-

шей мере учитывали геокриологические и климатические условия строительной площадки [Чжан, 1997].

Несомненно, что при возведении плотин на льдистых основаниях, причинами деформаций является оттаивание последних, а деформации выражаются в виде локальных просадок и провалов; промоин в местах примыкания земляной части плотин к бортам долин рек; продольных трещин и сползание откосов [Тимофеичук, 1960; Хомзе, 1966; Чжан, 1997].

Обследование гидроузлов в натурных условиях, наряду с вышеуказанными причинами, выявили ряд специфических видов деформаций как тела грунтовых плотин, так и мест примыкания их к водосбросам и водовыпускам. В этой

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

связи возникла необходимость формулировки и постановки проблемы исследований.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Специфическими видами деформаций являются трещины отслоения грунта от несущих конструкций водосбросов и водовыпусков, а также поперечные морозобойные трещины глухой грунтовой части плотин по трещинам усыхания. Для выяснения природы этих деформаций были выдвинуты следующие рабочие гипотезы.

Глухая часть грунтовой плотины имеет развитую поверхность теплообмена, как правило, в поперечном сечении это трапеция. В силу этого тело плотины испытывает гораздо большие температурно-влажностные градиенты по сравнению с плоскостью. В этом случае естественно предположить, что минеральные частицы дезинтегрируются, а грунтовый массив в целом подвержен морозобойному растрескиванию зимой и трещинам усыхания летом. Дезинтеграция минеральных частиц приводит к изменению гранулометрического состава и прочности грунта.

Причиной разрушения сооружений в местах примыкания грунтовой плотины к водопропускам считаем отделение грунта от стенки устоя в процессе промерзания—оттаивания. Механизм отслоения грунта от конструкций водосбросных и водопропускных сооружений нам представляется следующим. Устои гидротехнических сооружений интенсивно промерзают с наступлением отрицательных температур воздуха. В силу своей специфики они имеют часто сложную конфигурацию и развитую поверхность теплообмена с воздухом и водным потоком. К охлаждаемым поверхностям устремляется влага и замерзает на границе грунт-стенка устоя. В процессе дальнейшего промерзания на этой границе образуется ледяная прослойка, которая как бы отодвигает грунт от стенки устоя. С другой стороны, температурные деформации приводят к объемному сокращению грунта обратной засыпки. Наложение этих двух процессов приводит к отслоению грунта от стенки устоя. Весной, с наступлением положительных значений температуры воздуха, ледяные прослойки вытаивают, грунт за счет температурных деформаций увеличивается в объеме, но на величину меньшую, чем толщина ледяной прослойки. В результате между грунтом и стенкой устоя образуется щель, которая при пропуске воды является путем для контактной фильтрации, приводящая к деформациям сооружений на этом участке.

Для проверки выдвинутых гипотез были проведены комплексные исследования в натурных и лабораторных условиях.

Натурные исследования проводились на сооружениях Хоробутской системы лиманного орошения на р.Суола в Центральной Якутии. Физическое моделирование процесса отслоения грунта от стенки водопропуска проведено в Центральной инженерной лаборатории Института гляциологии и геокриологии АН КНР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Комплексные натурные исследования включали следующие виды: динамику физико-механического состава грунта глухой части плотины и устоев (бурение, шурфовка с отбором образцов для анализа на влажность, гранулометрический состав); динамику температурного режима (измерение в геотермических скважинах по общепринятой в геокриологии методике с помощью терморезисторов ММТ-1, ММТ-4); динамику давления грунта на стенку устоя (с помощью датчика давления типа ПДМ-70 — тензорезисторный преобразователь давления); динамику горизонтальных деформаций минеральных частиц грунта (перемещение измерялось с помощью специально сконструированного устройства с вторичным прибором часового типа ИЧ-10); динамику вертикальных деформаций (по специальным маркам с использованием нивелирования второго класса); исследование морозобойного растрескивания и трещин усыхания (инструментальная съемка, шурфовка, фотосъемка, отбор проб) [Zhang, 1996].

В лабораторных условиях был рассмотрен частный случай моделирования тепловых процессов, проходивший при следующих допущениях: материал модели и натуры одинаковы; темп промораживания грунта производился в температурных условиях натуры; идентичны с натурой были и абсолютные значения температуры наружного воздуха.

Изложенные допущения правомочны, так как в задачу эксперимента входило: а) установление факта образования прослойки льда на границе стенка устоя—грунт; б) проверка прижатия грунта к наклонной поверхности противофильтрационного устройства [Zhang et al., 1996].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплексные исследования Института мерзлотоведения СО РАН на грунтовых плотинах в Якутии гидромелиоративного назначения [Чжан, 1975; Чжан 1981] установили, что в процессе формирования их тепловлагостного режима, они испытывают значительные, по сравнению с естественными поверхностями, градиенты температуры и влажности; сильно иссушаются; грунтовые частицы подвержены дез-

интеграции и переупаковке в грунтовом массиве. При этом следует различать два вида преобразований в теле плотин — макро- (трещины усыхания, морозобойные) и микроструктурные (изменение гранулометрического состава и плотности).

Благодаря процессам иссушения и, возникающим при этом, большим градиентам влажности (до 0,2 долей единиц на метр) и температуры (до 20 град/м) на плотине летом широкое развитие получают трещины усыхания. Глубина проникновения их в тело плотины достигает 1,4 м при глубине протаивания 2,2 м, ширина поверху 3—5 см. Трещины усыхания обеспечивают аэрацию и окисление стенок. Окислительные реакции способствуют цементации частиц, за счет чего грунты хорошо держат вертикальные стенки [Сергеев и др., 1960]. С наступлением холодного

периода года трещины служат путями для поступления воздуха с отрицательными значениями температуры в тело плотины. Эффект этого охлаждения сказывается уже через несколько дней: температура грунта на глубине 2—2,5 м понижается до минус 4—5 °С. В результате резкого охлаждения и промерзания грунтов, летние трещины усыхания углубляются и достигают мерзлых грунтов ядра плотины. При дальнейшем охлаждении промерзшего грунта по этим трещинам развиваются морозобойные трещины.

Доказано [Конищев, 1962], что в условиях сезонного промерзания-оттаивания трещины усыхания предопределяют возникновение различных микроструктурных преобразований грунта. Это хорошо прослеживается в изменении гранулометрического состава грунта тела плотин. Фактические данные, приведенные в работе

Таблица 1. Динамика влажности и объемного веса грунтов правого устоя водосброса Хоробутской системы лиманного орошения

Глубина, м	8.08. 89 г.		1.09. 91 г.		11.04. 92 г.		13. 08. 93 г.	
	W, %	γ , г/см ³	0,5 м от стенки		0,5 м от стенки	2,5 м от стенки	0,5 от стенки	
			W, %	γ , г/см ³			W, %	γ , г/см ³
0,1							6,3	1,09
0,5							11,5	1,80
1,0	11,9	—	9,7	1,7	11,2	12,4	9,8	1,65
1,5							10,3	1,75
2,0			17,3	2,1	18,0	13,0	17,4	1,95
2,5							17,3	1,99
3,0	13,3	2,0	19,8	2,1	21,6	14,4	16,1	1,95
3,5							15,1	1,85
4,0			17,4	2,0	16,5	16,3	13,1	1,93
4,5							16,0	1,77
5,0	14,9	1,95				22,2		
6,0						24,7		
10,0	23,6	1,85						
15,0	24,7	1,85						

Таблица 2. Влажность и объемный вес грунта правого устоя водосброса Хоробутской системы лиманного орошения. Шурф со стороны нижнего бьефа (по данным на 10.10.93 г.)

Глубина, м	Расстояние от стенки устоя, м	Влажность, м	Объемный вес влажного грунта, т/м ³	Объемный вес скелета грунта, т/м ³	Примечания
0,2	0	12,8			Грунт мерзлый супесчано-суглинистый
	0,1	11,7	1,82	1,63	
	0,2	11,4	1,92	1,73	
	0,4	10,7	2,04	1,85	
	0,6	14,5	2,14	1,87	
0,4	0	15,9	1,86	1,61	То же
	0,1	11,7	2,04	1,82	
	0,2	10,0	1,85	1,68	
	0,4	9,9	1,99	1,82	
	0,6	11,4	2,0	1,80	
0,6	0	10,9	1,56	1,37	«
	0,1	14,8	1,84	1,62	
	0,2	10,8	1,83	1,66	
	0,6	10,3	1,96	1,79	
1,0	0	11,3	1,47	1,32	Грунт мерзлый—песок
	0,1	9,9	1,69	1,54	
	0,2	11,8	1,83	1,63	
	0,6	14,2	2,09	1,83	

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

[Чжан, 1981], свидетельствуют о том, что в результате сравнительно небольшого (всего 6) цикла промерзания-оттаивания в плотинах происходит дробление песчаных частиц крупнее 0,1 мм и накопление мелкозема, частиц размером 0,05—0,01 мм. Механизм этого процесса подробно описан в трудах [Полтев, 1966; Ребиндер, 1951; Конищев, 1973; Конищев, 1977; Ериков и др., 1973].

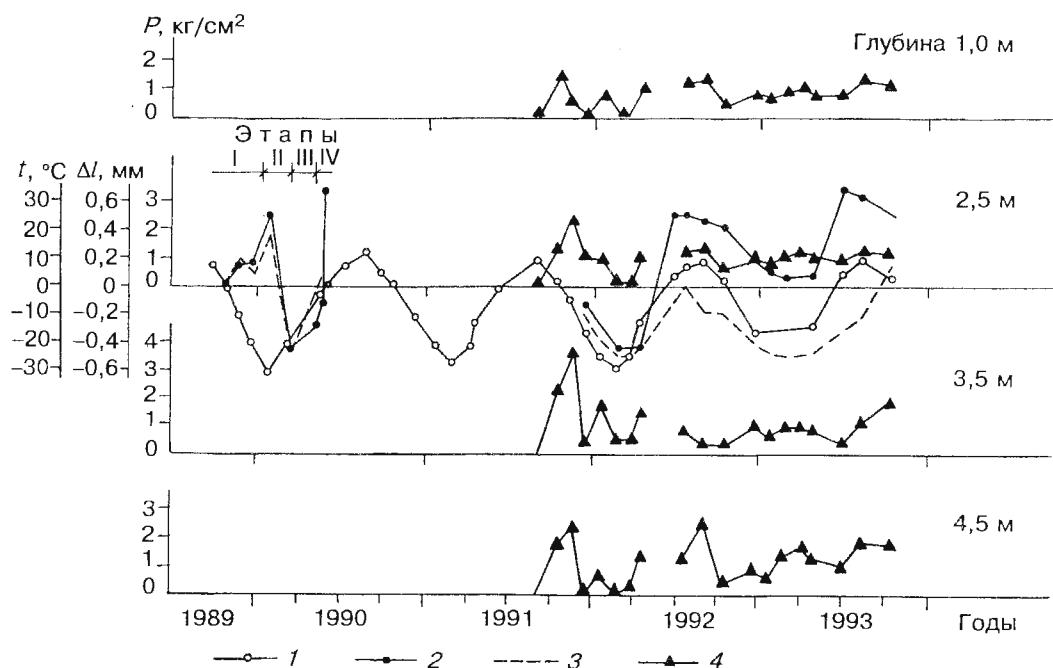
Результатом вышеописанных процессов, происходящих в грунтовых плотинах, являются изменения физических параметров грунта. Так, за шесть лет эксплуатации грунтовой плотины Хоробутской системы лиманного орошения произошло разуплотнение грунта на глубине 0,1 м от 1,7 г/см³ до 1,5 г/см³, а на глубине 0,4 м от 1,9 г/см³ до 1,7 г/см³. Таким образом, дезинтеграция песчаных грунтов способствовала развитию трещин усыхания, как первичных и морозобойных трещин, так и вторичных.

Большой интерес представляет и пространственное распределение влажности и плотности грунта. В табл. 1 и 2 представлены натурные наблюдения за динамикой влажности и объемной массой грунта обратной засыпки железобетонного водосброса Хоробутской системы лиманного орошения на р. Суоле в Республике Саха (Якутия). Следует сразу же отметить, что процесс формирования тепловлажностного режима сооружения не завершен и приведенные данные

носят промежуточный характер. По этим данным можно судить пока что только о наметившейся тенденции отмеченных процессов.

Средняя влажность грунта до глубины 5 м составляет 13,4%, объемная масса 1,96 г/см³. Грунты основания с глубины от 6 до 15 м имеют характерную для створа плотины влажность многолетнемерзлых грунтов 24% с объемной массой 1,85 г/см³. Несколько повышенные значения объемной массы грунта объясняются наличием включений гравелисто-щебнистых разностей. Уловить какую-либо четкую закономерность влажности грунта не представляется возможным, за исключением пристенного слоя (см. табл. 2). И тем не менее, в целом, с учетом уровенного режима пропуска воды через водосброс и процессов промерзания-оттаивания грунта, с определенной долей допущения можно констатировать следующее. За три года эксплуатации водосброса в интервале глубин 1—2 м в полуметре от стенки произошло увеличение влажности на 7—8 %. Начиная с четвертого года, наметилась тенденция к снижению влажности. На глубине 5—6 м в результате наличия постоянного источника влаги (фильтрационного потока в слое сезонного оттаивания) произошло увеличение влаги с 15% до 24%.

Что касается переупаковки минеральных частиц, то на расстоянии 0,5—0,8 м от стенки



Динамика деформаций и давления грунта за стенкой устоя.

1 — температура грунта в месте установки датчиков деформаций; 2 — деформации грунта на расстоянии 40 см от стенки устоя; 3 — то же на расстоянии 15 см; 4 — давление грунта на стенку; P , кг/см² — давление; t , °C — температура; Δl , мм — деформация.

наметилась тенденция к разуплотнению грунта по всей высоте устоя.

Исследования деформации грунта и давления, которое он оказывает на стенки устоя водосброса показали, что наиболее активно, как и следовало ожидать, процессы протекают в первые годы формирования тепловлажностного режима. Динамика деформаций и давления грунта в устое железобетонного водосброса Хоробутской системы лиманного орошения на р. Суоле показана на рисунке. По активности процесса в первый год эксплуатации условно выделено четыре временных этапа: первый с октября до начала января; второй с января до середины марта; третий с середины марта до начала мая и четвертый с середины мая до конца сентября.

Первый этап характеризуется движением минеральных частиц к стенке за счет замерзания свободной влаги, приводящей к увеличению объема грунта. Датчики фиксируют в это время увеличение давления от 0 до 2,3–3,6 кг/см². На втором этапе в результате глубокого охлаждения грунта (до -30 °С) замерзает оставшаяся свободная вода и часть незамерзшей влаги, это вызывало резкое увеличение объема грунта и дальнейшее перемещение частиц к стенке устоя. Одновременно, глубокое охлаждение грунта приводит к объемному сокращению минеральных частиц. Эти деформации постепенно накапливались и в конце февраля—начале марта привели к отрыву грунта от стенки устоя. Давление грунта на устой в этот момент упало до нуля. Третий этап, когда температура грунта повышается от -30 до 0 °С, характеризуется движением частиц к стенке устоя, обусловленное температурными деформациями минеральных частиц грунта. И наконец, на четвертом этапе, в конце мая месяца, когда температура грунта повысилась до положительных значений и началась контурная фильтрация в устоях, наблюдения были прерваны.

Максимальное перемещение минеральных частиц в первую зиму составило 2 мм. Спустя год, датчики были восстановлены и наблюдения были продолжены, они свидетельствуют о том, что грунт „дышит“, совершая колебательные перемещения от сезона к сезону. Давление при этом четко реагирует на деформации грунта. Вплоть до четвертого года эксплуатации процессы были настолько интенсивны, что давление в критические периоды года падало до нуля. Начиная с пятого года, давление стабилизировалось как по высоте устоя, так и во времени. Среднее значение давления грунта по высоте устоя составило 0,12 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выдвинутая Институтом мерзлотоведения СО РАН гипотеза возникновения специфических

видов деформаций, являющихся в большинстве случаев причинами крупных деформаций и аварий сооружений, получила подтверждение в натурных и лабораторных экспериментах. Впервые получены в натурных условиях значения деформаций и давления грунта, оказываемое на стенки устоев водопропускных сооружений, которые для данных мерзлотно-климатических условий можно использовать при проектировании. На основе исследований предложено инженерное решение сопрягающего устоя, на которое получено авторское свидетельство [Чжан, Мелкозеров, 1991]. Данное решение внедрено на сооружениях двух мелиоративных систем в Якутии.

Литература

- Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М., Изд-во Энергия, 1975, 184 с.
- Ершов Э.Д., Иващенко И.Н., Захаров М.Н. и др., Влияние процесса сублимации льда на физико-механические свойства мерзлых пород // Мерзлотные исследования, вып. XIII. М., Изд-во МГУ, 1973, с. 172–175.
- Конищев В.Н. Некоторые особенности покровных суглинков Юго-Восточной части Большеземельской тундры в связи с их генезисом // Вопросы географического мерзлотоведения перигляциальной морфологии. М., Изд-во МГУ, 1962, с. 131–140.
- Конищев В.Н. Криогенное выветривание. II МК по мерзлотоведению // Докл. и сообщ., вып. 3, Якуткнигоиздат, 1973, с. 38–45.
- Конищев В.Н. Общие закономерности криогенной дезинтеграции минералов // Мерзлые породы и снежный покров. М., Изд-во Недра, 1977, с. 3–16.
- Полтев Н.Ф. Изменение гранулометрического состава песчаных грунтов при воздействии на них растворов электролитов и процесса замерзания-оттаивания // Мерзлотные исследования, вып. 6. Изд-во МГУ, 1966, с. 199–206.
- Ребиндер П.А., Лотгинов Г.И. Новые физико-химические пути технологии строительных материалов // Вестник АН СССР, 1951, № 10, с. 47–54.
- Сергеев Е.М., Минервин А.В. Сущность процесса облессования в подзольной зоне // Вестник МГУ, сер. IV, Геология, № 3, 1960, с. 3–14.
- Тимофеичук В.С Деформации земляных плотин талого типа на вечномерзлых грунтах // Колыма, 1960, № 8, с. 40–42.
- Хомзе В.А. Особенности проектирования и строительства низконапорных земляных плотин на вечномерзлых грунтах // Тр. IV совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Т. X, Воркута, 1966, секция гидротехнических сооружений. Красноярск, 1966, 22 с.
- Чжан Р.В. Водно-тепловой режим земляных плотин лиманного назначения // Тр. Якутского НИИ сельского хозяйства. Вып. XII, Якутск, 1972, с. 93–101.
- Чжан Р.В. Температурный режим низконапорных земляных плотин для лиманного орошения в условиях Центральной Якутии // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 101. Гидротехническое строительство в районах Крайнего Севера. Л., 1975, с. 79–85.
- Чжан Р.В. Некоторые особенности деформаций земляных плотин низкого напора в условиях вечной мерзлоты // Научные основы мелиорации земель при создании территориально-производственных комплексов в Сибири. Красноярск, 1980, с. 97–98.
- Чжан Р.В. Динамика влажности грунтов низконапорных плотин в условиях вечной мерзлоты // Инженерные иссле-

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

дования мерзлых грунтов. Новосибирск, Наука, 1981, с. 117—121.

Чжан Р.В. Изменения физико-механических свойств промерзающих и протаивающих дисперсных грунтов в плотинах низкого напора // Исследование состава, строения и свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих пород с целью наиболее рационального проектирования и строительства. М., 1981, с. 115—117.

Чжан Р.В., Мелкозеров Г.В. Сопрягающий устой. Приоритет изобретения 30.01.90 г. А.С. № 1705479. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Союза ССР 15.09.91 г.

Чжан Р.В. Обеспечение устойчивости гидротехнических сооружений водохозяйственного назначения в Якутии // Наука и образование, 1997, № 1, с. 139—140.

Zhang R.V. Filld studies of the dinamics of temperature regime? pressure and soil deformations around the reinforced concrete spillway under central Jakutia conditions // International symposium: Cold regions engineering. Harbin, China, 1996, p. 22—24.

Zhang R.V., Zhu Linnan, Zhang Changqing. A physical model stady on the Interaction between aquedusts and freezing, thawing and frozen soils. In the same place, 1996, p. 27—29.

Поступила в редакцию
12 июля 1997 г.

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ НА СИЛЬНОЛЬДИСТЫХ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ И МЕТОДЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

В.Г. Кондратьев

Акционерное общество Мосгипротранс, 129278, Москва, ул. П. Корчагина, 2, Россия

Деформации земляного полотна на вечномерзлых грунтах в основном связаны с деградацией мерзлоты в его основании вследствие увеличения количества поглощенной солнечной радиации техногенной поверхностью по сравнению с естественной поверхностью, просачивания летних осадков через тело насыпи, увеличения толщины снежного покрова в нижней части насыпи и на прилегающей территории и фильтрации поверхностных и подземных вод в тело и основание насыпи на косогорных участках.

В соавторстве с группой специалистов нами разработано несколько методов укрепления основания земляного полотна на сильнольдистых грунтах, основанных на регулировании соотношения охлаждающих и отепляющих факторов с целью сохранения основания в постоянно мерзлом состоянии (с помощью снегоочистки и окраски, солнцеосадкозащитного навеса, поперечных охлаждающих труб, пленочного экрана, продольных охлаждающих устройств) или на превентивном удалении льдистых массивов грунтов (ледяных линз) из основания и заполнении образующихся полостей непросадочными грунтами.

На основе этих изобретений разработана рабочая документация опытно-экспериментальных участков земляного полотна строящейся ж.д. линии Беркакит — Якутск (с навесом, пленочным экраном, поперечными и продольными охлаждающими устройствами). Экспериментальные работы начаты также на Байкало-Амурской (по снегоочистке) и на Забайкальской (по навесу, окраске и другим техническим решениям) железных дорогах.

Деформации земляного полотна, вечная мерзлота, снегоочистка, окраска, навес, охлаждающие трубы, пленочный экран, устройства для аккумуляции холода, удаление ледяных масс

DEFORMATION OF ROADBEDS ON ICY PERMAFROST GROUND AND METHODS AGAINST IT

V.G. Kondratiev

Joint stock company Mosgiprotrans, 129278, Moscow, P.Korchagin, 2, Russia

Deformations of roadbed on permafrost soils are connected mostly with permafrost degradation in the roadbed base main factors, causing thawing of permafrost in the base of roadbeds, usually are: increasing amount of absorbed solar radiation by the man-induced surface in contrast with the natural surface; infiltration of warm summer precipitation through the body of embankment; increasing thickness of snow cover in lower part of embankment and at the adjoining territory; warming effect of the surface and underground water on slope.

In co-authorship with a group of specialists we have developed several methods of strengthening of roadbed base on very icy permafrost soils, which are based on adjustment of ratio of cooling and warming factors with the purpose to reduce average annual temperatures of soils and to preserve them in a permanently frozen state (snow removal and painting, sun and precipitation protective shed, cooling pipes, film cover, cold accumulation devices) or based on preventive removal of very icy masses (ice lenses) from a permanently frozen base and filling the cavities formed with a high consistency soils. On the basis of the above technological concepts with the purpose to test their efficiency in operation conditions and to try out the techniques Mosgiprotrans designs pilot-experimental roadbed sections of Berkakit — Yakutsk Railway being under construction now. Experimental works have been started also on the Baikal-Amur railroad with the use of some new ways, in particular, snow cleaning, and on Transbaikal railroad.

Deformation of roadbed, permafrost, snow removal, painting, shed, cooling pipes, film cover, cold accumulation devices, removal of icy masses

ВВЕДЕНИЕ

Деформации земляного полотна дорог на вечномерзлых грунтах чаще всего связаны с деградацией мерзлоты в их основании. Например, на БАМе таких деформаций около 70% [Белозеров, 1993; Яковлев, 1992]. Обычно причинами многолетнего оттаивания вечномерзлых грунтов под земляным полотном железных дорог являются:

увеличение количества поглощенной солнечной радиации поверхностью земляного полотна по сравнению с естественной поверхностью; инфильтрация теплых летних осадков через тело насыпи; увеличение толщины снежного покрова у основания насыпи и на прилегающей территории; фильтрация поверхностных и подзем-

ных вод в тело и основание земляного полотна на косогорных участках.

Основными мероприятиями по обеспечению устойчивости земляного полотна на слабом и просадочном при оттаивании основаниях обычно являются: создание запаса по ширине и высоте насыпи, подъемка пути на балласт, сооружение берм, отсыпка насыпи скальным грунтом, вырезка льдонасыщенных грунтов основания с заменой послойно уплотняемым дренирующим материалом и др. [Изыскания, 1977]. Перечисленные мероприятия носят преимущественно пассивный характер, так как нацелены в основном на преодоление последствий деградации мерзлоты, требуют больших расходов на сооружение и поддержание в рабочем состоянии пути и не решают проблемы обеспечения устойчивости земляного полотна на грунтах III и IV категорий просадочности [Бушин, 1992; Яковлев, 1992].

Очевидна необходимость разработки активных и более эффективных мероприятий по обеспечению устойчивости земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах, направленных на устранение главной причины деформаций: деградации мерзлоты в основании земляного полотна дорог.

Нами в соавторстве с группой специалистов разработано несколько способов укрепления основания земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах, предусматривающих регулирование соотношения охлаждающих и отепляющих факторов с целью понижения среднегодовой температуры грунтов и сохранения их в многолетнемерзлом состоянии на протяжении всего времени эксплуатации пути или, наоборот, превентивного оттаивания сильнольдистых массивов: укрепление основания земляного полотна с помощью снегоочистки и окраски [Кондратьев и др., 1992а]; укрепление основания земляного полотна с помощью солнцеосадкозащитного навеса [Кондратьев и др., 1992б]; укрепление основания земляного полотна с помощью поперечных охлаждающих труб [Кондратьев и др., 1993а]; укрепление основания земляного полотна на участках с поперечным уклоном местности с применением пленочного экрана [Кондратьев, 1993]; укрепление основания земляного полотна на участках с поперечным уклоном местности с помощью продольных устройств для аккумуляции холода [Кондратьев и др., 1993б]; укрепление основания земляного полотна путем принудительного оттаивания льдистых грунтов [Кондратьев и др., 1994].

СНЕГООЧИСТКА И ОКРАСКА НАСЫПИ И ЧАСТИ ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ

На участках просадочных при оттаивании многолетнемерзлых грунтов возводят насыпь по технологии, предусматривающей сохранение

грунтов основания в многолетнемерзлом состоянии: просеки прорубают зимой без корчевки пней, максимально сохраняется мохово-растительный покров; первый слой насыпи отсыпается методом „с головы“, не допуская движения машин по естественному основанию; производится послойное уплотнение насыпи.

В первой половине зимы (с момента установления устойчивого снежного покрова и до момента инверсии знака теплопотока) производится систематическое удаление снега с проезжей части пути, откосов насыпи и части прилегающей территории. Момент инверсии знака теплопотока устанавливается по данным ближайшей метеостанции, когда среднесуточная температура воздуха становится устойчиво выше среднесуточной температуры поверхности почвы. Ширина очищаемой от снега полосы возле насыпи должна, как правило, быть больше ширины боковой поверхности насыпи, однако не должна превышать мощность слоя годовых колебаний температуры грунтов для оголенной поверхности. Снегоочистка может осуществляться любым способом: механическим, газодинамическим с помощью авиационного двигателя, установленного на платформе или дрезине и др.

Весной после схода снега производится окраска откосов насыпи южной, восточной и западной экспозиций, а также верхнего строения пути в белый цвет. Экспозиция откосов насыпи определяется по плану трассы или на месте в зависимости от ориентации по странам света. Краска может быть любой, но обязательно экологически чистой. Покраску пути можно производить краскопультом любой конструкции, установленным на платформе (дрезине) или переносным. Окраска пути должна хорошо отражать солнечную радиацию в весенне-летний период, поэтому при загрязнении 60% защищаемой поверхности ее следует обновлять.

Положительный эффект достигается тем, что устранение теплоизолирующего влияния снега в первой половине зимы резко усиливает тепловой поток из грунтов тела и основания насыпи в атмосферу — происходит их интенсивное охлаждение.

Существенное увеличение альбедо поверхности (α), покрытой новой ($\alpha = 75\%$) или старой ($\alpha = 55\%$) белой краской, по сравнению с естественной поверхностью мари ($\alpha = 25\%$) и в особенности зачерненной мазутом и угольной пылью поверхностью пути ($\alpha = 6\%$) уменьшает количество поглощенной солнечной радиации, сокращает летний прогрев земляного полотна. Усиление зимнего охлаждения и уменьшение летнего прогрева сохраняют основание пути в мерзлом состоянии. Предотвращение деградации мерзлоты в основании земляного полотна исключает развитие его многолетней осадки.

СОЛНЦЕОСАДКОЗАЩИТНЫЙ НАВЕС

Устройство над насыпью солнцеосадкозащитного навеса предотвращает отепляющее влияние прямой солнечной радиации и летних осадков, а также резко снижает теплоизолирующее влияние снежного покрова.

Принципиальная схема железнодорожного пути изображена на рис. 1.

На участках земляного полотна с основанием из сильнольдистых грунтов или с включением подземных льдов отсыпается насыпь обычной конструкции без снятия мохово-растительного покрова. Дополнительно устраивается солнцеосадкозащитный навес. Конструкция навеса выбирается в зависимости от географической широты и климатических условий местности, экспозиции откосов и высоты насыпи. Профиль крыши может быть выпуклой (рис. 1, А) одно- или двускатной (рис. 1, Б и 1, В) формы.

Навес должен защищать основную площадку и откосы насыпи, а также часть прилегающей территории, включая водозащитные валики, от

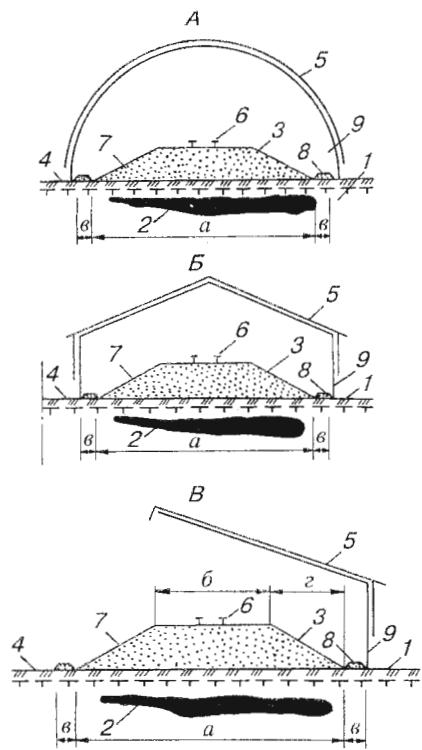


Рис. 1. Принципиальная схема железнодорожного пути с солнцеосадкозащитным навесом.

А, Б и В — с выпуклым, двускатным и односкатным профилем крыши соответственно. 1 — сильнольдистое основание насыпи; 2 — подземный лед; 3 — насыпь; 4 — мохово-растительный покров; 5 — навес; 6 — рельсы; 7 — откос насыпи; 8 — водозащитный валик; 9 — продух. а, б, в и г — ширина насыпи, основной площадки, валика и южного откоса соответственно.

дождя и прямой солнечной радиации весной и летом и препятствовать накоплению снега зимой. Для этого устраивают продухи в нижней части навеса, способствующие выносу снега за пределы пути воздушным потоком при прохождении поезда или во время метели. Ширина навеса должна быть не меньше суммы поперечных размеров насыпи (а) и водозащитных валиков (в) при меридиональном направлении пути и не меньше суммы поперечных размеров основной площадки (б), южных откосов насыпи (г) и водозащитного валика (в) при широтной ориентации. Высота навеса должна быть не менее суммы высоты габарита приближения строений и оптимальной высоты насыпи, определяемой по результатам теплотехнических расчетов для конкретных участков трассы. При этом указанный габарит должен входить во внутреннее пространство навеса.

Навес может применяться не только на участках насыпей, а также на нулевых местах продольного профиля и в выемках.

Положительный эффект достигается тем, что навесом при сохранении возможности интенсивного зимнего охлаждения земляного полотна и его основания исключаются инфильтрация летних осадков и прямая солнечная радиация, являющиеся обычно основными причинами деградации мерзлоты и деформаций земляного полотна на относительно ровных участках местности.

При сохранении высоких прочностных свойств мерзлых грунтов основания в течение всего периода эксплуатации дороги отпадает необходимость в дополнительных противодеформационных мероприятиях, упрощается конструкция насыпи, возрастают пропускная способность линии и сроки службы элементов пути.

ПОПЕРЕЧНЫЕ ОХЛАЖДАЮЩИЕ ТРУБЫ

Укрепление основания земляного полотна достигается посредством размещения системы охлаждающих труб в нижней части насыпи так, что грунты основания сохраняются в многолетнемерзлом состоянии. Конструкция насыпи с охлаждающей системой показана на рис. 2.

Охлаждающая система состоит из одного или нескольких рядов труб, уложенных поперек насыпи, через которые пускается хладоагент (холодный или охлажденный воздух, воздушно-газовая смесь) путем естественной или принудительной вентиляции. Диаметр труб, шаг их укладки и количество рядов определяются с помощью теплотехнических расчетов. Вентиляция осуществляется с помощью магистральных труб, входного и выходного патрубков. Для усиления естественной вентиляции отверстия входных и выходных патрубков располагаются на разных

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ

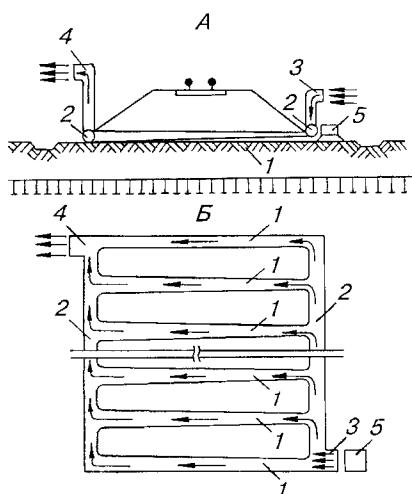


Рис. 2. Система охлаждающих труб в основании насыпи: в разрезе (А) и в плане (Б).

1 и 2 — охлаждающие и магистральные трубы; 3 и 4 — входной и выходной патрубки; 5 — вентилятор.

уровнях. Этому же способствует укладка труб с наклоном в низовую сторону земляного полотна или применение труб конической формы. В случае принудительной вентиляции дополнительно предусматривается включение вентилятора, что позволяет также в случае необходимости производить охлаждение грунтов основания летом с помощью воздушно-газовых смесей, например, воздушно-азотной, и обеспечить стабильность земляного полотна даже в аномально теплые годы.

ПЛЕНОЧНЫЙ ЭКРАН

На косогорных участках для сохранения грунтов основания земляного полотна в многолетнемерзлом состоянии необходимо преодолеть отепляющее влияние не только солнечной радиации и атмосферных осадков, но также поверхностных и надмерзлотных вод, стекающих к насыпи с нагорной стороны.

Влияние поверхностных и надмерзлотных вод может быть устранено путем устройства противофильтрационного экрана (рис. 3) из полимерной пленки на границах мерзлого ядра со сливной призмой и с бермой с верховой стороны. Для надежной консервации мерзлого состояния грунтов тела и основания насыпи берма состоит из теплоизоляционного и противофильтрационного слоев и врезана в основание на глубину превышающую мощность сезонноталого слоя. Откос насыпи с низовой стороны укреплен каменной наброской, также способствующей охлаждению грунтов тела и основания насыпи. В случае южной экспозиции откоса каменный ма-

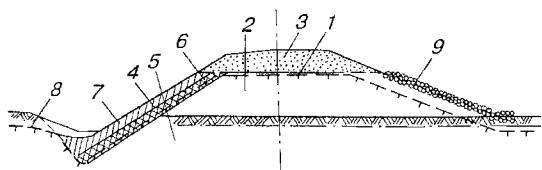


Рис. 3. Конструкция насыпи с пленочным экраном.

1 — полимерная пленка; 2 — мерзлое ядро насыпи; 3 — сливная призма; 4 — берма; 5 — сильнольдистое основание насыпи; 6 и 7 — теплоизоляционный и противофильтрационный слои бермы; 8 — подушка сезонноталого слоя; 9 — каменная наброска.

териал должен иметь естественный или специально созданный светоотражающий цвет. Основание сливной призмы должно иметь уклон в низовую сторону для стока атмосферных вод.

Технология сооружения насыпи следующая. В конце лета—осенью возводят насыпь из связных грунтов (суглинков, супеси) и с нагорной стороны осуществляют врезку в основание на глубину, превышающую мощность сезонноталого слоя (от поверхности водоотводной канавы) на 0,5—0,7 м. Низовой откос насыпи покрывают наброской из фракционного камня со средним диаметром 0,3—0,5 м. По окончании полного промораживания насыпи или в конце зимы во врезку и на мерзлое тело насыпи настилают пленочный экран. Формируется верховая берма из теплоизоляционного и противофильтрационного слоев. Теплоизоляционный слой отсыпается из песчано-щебенистых грунтов, а противофильтрационный слой — из укатанных глинистых или суглинистых отложений. Общая мощность слоев должна превышать глубину сезонного оттаивания. Для уменьшения последней целесообразно покрывать берму мхом, дерном, торфом и другими теплоизоляционными материалами. Затем формируется основная площадка насыпи со сливной призмой. Если низовой откос насыпи обращен в южную сторону, а наброска выполнена из темноцветного камня, то для уменьшения влияния солнечной радиации она окрашивается в белый цвет.

ПРОДОЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АККУМУЛЯЦИИ ХОЛОДА

Основным недостатком описанной выше конструкции с противофильтрационным экраном из полимерной пленки является трудоемкость работ в условиях эксплуатирующихся дорог и ограничение применения преимущественно новым строительством. Характеризуемая ниже конструкция лишена указанного недостатка.

Устранение отепляющего влияния поверхностных и надмерзлотных вод на косогорных

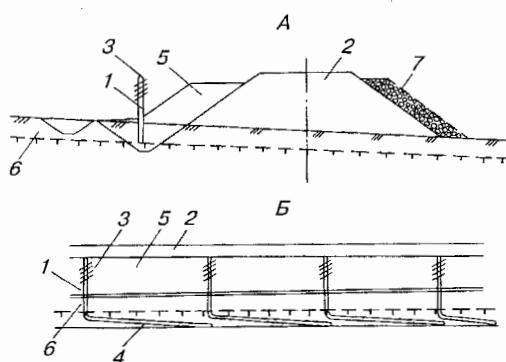


Рис. 4. Конструкция насыпи с устройством для аккумуляции холода: А — в поперечном, Б — в продольном разрезах.

1 — устройство для аккумуляции холода; 2 — насыпь; 3 и 4 — воздушный и грунтовый теплообменники; 5 — противофильтрационная берма; 6 — подошва сезонноталого слоя; 7 — каменная наброска.

участках может быть достигнуто путем создания противофильтрационного экрана из мерзлых грунтов (рис. 4) с помощью устройств для аккумуляции холода типа термосвай Лонга, Гапеева, Макарова и др., размещаемых вдоль насыпи с верховой стороны. При этом воздушный теплообменник устройств устанавливается вертикально, а грунтовый — вдоль насыпи под углом 95—100° к вертикалам. Для надежной консервации в мерзлом состоянии грунтов тела и основания насыпи сооружается противофильтрационная берма, которая врезается в основание на глубину, превышающую мощность сезонноталого слоя. Откос насыпи с низовой стороны укрепляется каменной наброской, также способствующей охлаждению насыпи, причем в случае южной экспозиции откоса каменный материал должен иметь естественный или специально созданный светоотражающий цвет.

Технология сооружения насыпи следующая. В конце лета—осенью возводят насыпь из талых связных грунтов (суглинков, супеси) и с нагорной стороны осуществляют врезку в основание на глубину, превышающую мощность сезонноталого слоя (от дна водоотводной канавы) на 0,5—0,7 м и устанавливают устройства для аккумуляции холода по схеме, указанной на рис. 4. Затем формируют противофильтрационную берму из уплотненных глинистых или суглинистых отложений. Для уменьшения глубины сезонного оттаивания грунтов целесообразно покрывать берму теплоизоляционными материалами после промораживания насыпи, перед наступлением периода оттаивания. Установка охлаждающих устройств может быть выполнена и после сооружения верховой бермы с помощью вертикального

и наклонного бурения или открытия специальных канав (прорезей).

Тело насыпи может быть сооружено и из скального (дренирующего) грунта. В этом случае отсыпка грунта выполняется в зимнее время, а летом с нагорной стороны отрывается траншея на 0,5—0,7 м ниже кровли многолетнемерзлых пород. В ней устанавливаются устройства для аккумуляции холода. Производится засыпка траншеи талыми глинами или суглинками, которые при этом тщательно уплотняются. Из таких же грунтов формируется противофильтрационная берма.

Низовой откос насыпи покрывают наброской из фракционного морозостойкого камня со средним диаметром 0,3—0,5 м. Если этот откос насыпи обращен в южную сторону, а наброска выполнена из темноцветного камня, то для уменьшения весеннелетнего прогрева насыпи солнечной радиацией откос покрывается белой краской (светоотражающим покрытием).

ПРИНУДИТЕЛЬНОЕ ОТТАИВАНИЕ СИЛЬНОЛЬДИСТЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В некоторых случаях, в особенности на участках с температурой грунтов близкой к 0°C, может оказаться целесообразным вместо постоянного поддерживания отрицательной температуры грунтов принять превентивные меры по их оттаиванию и упрочнению. Для этого специально разработана технология разрушения и удаления сильнольдистых вечномерзлых грунтов или залежей льда в основании земляного полотна гидродинамическим способом через специальные скважины, по которым производится также одновременное замещение возникающих полостей талым непросадочным грунтом с необходимыми свойствами, например, песком или грунтово-цементной смесью. В таком случае исключаются опасные осадки насыпи при любых тепловых воздействиях и изменениях природной среды.

ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

На основе изложенных выше технических решений с целью проверки в производственных условиях их эффективности и отработки технологии строительства и текущего содержания противодеформационных сооружений запроектированы опытно-экспериментальные участки земляного полотна строящейся железнодорожной линии Беркакит—Томмот—Якутск.

В частности, на 708 км линии, между разъездами Боттома и Кирим, предполагается испытать солнцеосадкозащитный навес. Экспериментальный участок расположен на Абалахской террасе р. Лена, сложен на глубину 10—15 м озер-

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ДОРОГ

но-болотными, озерно-аллювиальными и аллювиальными супесчано-суглинистыми грунтами с прослойками и жилами льда и льдогрунтов. Относительная тепловая осадка составляет 0,1—0,7. Пригодных для сооружения насыпи грунтов вблизи практически нет. Дальность возки нужных грунтов составляет 20 км, а скального грунта — 48 км.

Предшествующим проектным решением сохранение основания в мерзлом состоянии на данном участке предусматривалось осуществить с помощью парожидкостных термотруб, устанавливаемых через 2 м у подошвы насыпи, и пенопласта в основании.

В опытно-экспериментальном проекте предлагаются решить эту задачу, т.е. обеспечить многолетнемерзлое состояние грунтов, с помощью навеса, представляющего собой цилиндрическое покрытие пролетом 9,5 м для однопутного ж.д. пути с прямолинейными окрылками длиной 4 м, которое осуществляется путем установки арок пролетом 9,5 м и стрелой подъема 4,75 м на треугольные опоры с подошвой 3 м и высотой 3,5 м. Между арками устанавливаются связи. В качестве ограждающего элемента принят профнастил, который укладывается на прогоны с шагом 1,5 м. В качестве фундамента арок приняты монолитные бетонные слабоармированные блоки, устанавливаемые на подсыпке.

Как показали расчеты, стоимость ж.д. пути с навесом оказывается на 20% ниже, чем с парожидкостными установками. Техническое же преимущество очевидно, поскольку под навесом надежно обеспечивается сохранение всего осно-

вания насыпи в многолетнемерзлом состоянии, тогда как парожидкостные установки, имеющие радиус действия всего 1,5 м, охлаждают лишь крайние участки подошвы насыпи, не устраняя опасности оттаивания грунтов в средней части подошвы. Очевидны преимущества навеса также в части простоты и надежности при эксплуатации линии.

На 383 км, в районе Томмота, предполагается построить опытно-экспериментальный участок для проверки и сравнения трех других технических решений: проектной конструкции в виде насыпи из скального грунта с глинистыми частицами не более 20%, с пенопластом в основании толщиной 0,1 м на ширину 3,5—4 м от оси пути, с каменной наброской из доломита слоем 0,8 м с размерами кусков 0,2—0,4 м на откосах; опытно-экспериментальной конструкции из длинномерных секционных термостабилизаторов в соответствии с патентом на изобретение № 2059752, устанавливаемых у верховой (справа по ходу километров) подошвы насыпи, исключив при этом каменную наброску с этой стороны; опытно-экспериментальной конструкции в соответствии с патентом на изобретение № 2010919 с охлаждением насыпи и грунтов основания путем принудительного проветривания по чугунным трубам диаметром 150 мм, укладывающимся в нижней части насыпи, исключив каменные наброски с обеих сторон насыпи и пенопласт из ее основания.

Как видно из таблицы, на участках сильнольдистых грунтов все предлагаемые решения являются целесообразными и могут конкури-

Сметная стоимость 1 погонного метра земляного полотна различных противодеформационных конструкций ж.д. линии Томмот—Якутск

Конструкция земляного полотна	Стоймость в ценах 1991 г., руб.
Насыпь высотой 1,5—2,5 м с каменной наброской на откосах и пенопластом 0,1 м в основании на участках:	
Томмот-Амга	210
Боттома-Кирим	320
Насыпь высотой 1,5—2,5 м с вертикальными парожидкостными установками глубиной 7 м у подошвы через 2 м и пенопластом 0,1 м в основании на участке Боттома-Кирим	1120
Насыпь высотой 1,5—2,5 м с длинномерными секционными термостабилизаторами у верховой подошвы на участке Томмот-Амга:	
с пенопластом 0,1 м в основании и каменной наброской на низовом откосе	502
без пенопласта	390
без пенопласта и каменной наброски	340
Насыпь высотой 2—4 м с принудительным проветриванием по чугунным трубам диаметром 150 мм, уложенным через 3 м в нижней части насыпи на участке Томмот-Амга:	
при длине участка 70 м	415
при длине участка 280 м	250
при длине участка 700 м	200
при наличии рядом пункта обогрева	190
Насыпь высотой 1,5—2,5 м с солнцеосадкозащитным навесом	
на участке Томмот-Амга	790
на участке Боттома-Кирим	900

ровать с заложенными в проект земляного полотна железнодорожной линии Томмот—Якутск конструкциями с парожидкостными установками у подошвы насыпи или с каменной наброской на откосах насыпи и пенопластом в основании.

Начаты опытно-экспериментальные работы и на Забайкальской ж.д. В частности, разработано технико-экономическое обоснование возможных технических решений по устранению и предотвращению дальнейшего развития деформаций земляного полотна на одном из участков многолетней деградации вечной мерзлоты в основании пути. Комплекс предложенных мероприятий и решений оказался более целесообразным как в техническом, так и экономическом отношениях: его стоимость, а соответственно и срок окупаемости, оказались в 1,8 раза меньше соответствующих показателей ранее разработанного проекта.

В этой связи интересны эксперименты Д. Зарлинга и А. Брэлея [Zarling *et al.*, 1986], проведенные на Аляске для разработки наиболее экстремальных методов лечения земляного полотна (охлаждения откосов автодороги в районах вечной мерзлоты). Проверялось три метода: сооружение на откосах дороги навеса из дерева и фанеры для затенения грунта в течение лета и предохранения от влияния снега, как теплоизоляционного покрова зимой; периодическая (1 раз в месяц) очистка от снега в течение зимы участка бермы автодороги и установка на откосах насыпи термосифонов.

Наибольшую эффективность показали насыпи. Они, по мнению Д. Зарлинга и А. Брэлея, могут быть достаточными для охлаждения грунтов насыпей на 3—5° в течение нескольких лет. Снегоочистка также показала значительную пользу, однако она, как считают авторы, может потребовать больших усилий в годы обильных снегопадов.

Аляскинский опыт подтверждает перспективность разработки способов укрепления основания земляного полотна на вечномерзлых грунтах, основанных на регулировании соотношения охлаждающих и отепляющих факторов с целью понижения среднегодовой температуры грунтов и сохранения их в многолетнемерзлом состоянии.

Наши технические решения представляются более эффективными, поскольку навесом перекрывается все земляное полотно, а не только откос насыпи, как в экспериментах Д. Зарлинга и А. Брэлея; снегоочистка выполняется только тогда, когда теплопоток имеет направление в атмосферу, а в летний период теплопоток в грунт уменьшается светоотражающей покраской.

Литература

- Белозеров А.И. Деформации земляного полотна на Байкало-Амурской магистрали // Транспортное строительство. 1993, № 5—6, с. 11—14.
- Бушин А.В. О задачах по обеспечению надежности земляного полотна железных дорог в современных условиях // Ж.-д. транспорт, сер. Путь и путевое хозяйство; ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС, 1992, вып. 5—6, с. 1—14.
- Изыскания и проектирование трассы Байкало-Амурской магистрали // Справочно-методическое пособие / Под ред. Д.И. Федорова; М.; Транспорт, 1977, 206 с.
- Кондратьев В.Г. Насыпь на участках с поперечным уклоном местности и сильнольдистыми вечномерзлыми грунтами. Патент на изобретение № 1807173, 1993, 3 с.
- Кондратьев В.Г., Королев А.А., Карлинский М.И. и др. Способ укрепления основания земляного полотна на сильнольдистых грунтах. Патент на изобретение № 1764371, 1992а, 5 с.
- Кондратьев В.Г., Королев А.А., Карлинский М.И. и др. Железнодорожный путь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 1740555, 1992б, 5 с.
- Кондратьев В.Г., Карлинский М.И., Савельев Б.А., Соколов А.В. Насыпь на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 2010919, 1993а, 4 с.
- Кондратьев В.Г., Кобзев В.А., Гусаков В.А. Насыпь на косогорных участках местности с сильнольдистыми многолетнемерзлыми грунтами. Патент на изобретение № 2059752, 1993б, 4 с.
- Кондратьев В.Г., Брод И.И. Способ укрепления основания земляного полотна на сильнольдистых вечномерзлых грунтах. Патент на изобретение № 2074928, 1994, 5 с.
- Яковлев В.Е. Текущее содержание и капитальный ремонт земляного полотна в условиях БАМ ж.д. // Ж.-д. транспорт, сер. „Путь и путевое хозяйство“; ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС, 1992, вып. 5—6, с. 14—28.
- Zarling D. P., Braley A.W. That stabilization of roadway embankments constructed over permafrost // Report NO FHWA-AK-RD-81-20, 1986, 33 р.

Поступила в редакцию
15 июля 1997 г.

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 79—84

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 574.4.001.57:581.526.533

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ УГЛЕРОДНЫХ
ПОТОКОВ В ТУНДРОВЫХ ЛАНДШАФТАХ

Д. Г. Замолодчиков*, Д. В. Карелин**,**, А. И. Иващенко**

* Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, 117418, Новочеремушкинская ул., 69, Россия
** Московский государственный университет, биологический ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

Для характеристики углеродного цикла ландшафта типичной тундры Северо-Западного Таймыра использован геоинформационный подход. Основными частями построенной ГИС являются: 1) компьютерная карта границ тундровых биогеоценозов, 2) база данных по суточным погодным параметрам, 3) модель сезонной динамики надземной фитомассы, 4) имитационная модель углеродных потоков. Оценены сезонные углеродные потоки (валовое дыхание, валовая продукция, чистый поток) для слагающих ландшафт биогеоценозов. Сезонный углеродный баланс (июнь—сентябрь) ландшафта охарактеризован как близкий к нулевому. Проведен компьютерный эксперимент, имитирующий влияние изменений температуры и облачности на углеродный баланс ландшафта типичных тундр.

Углеродный цикл, тундра, ландшафт, геоинформационная система, глобальные изменения

GEOINFORMATION-APPROACH TO INVESTIGATION OF CARBON FLUXES IN TUNDRA LANDSCAPES

D. G. Zamolodchikov*, D. V. Karelin**,**, A. I. Ivashchenko**

* Center for problems of ecology and productivity of forests, RAS, 117418, Moscow Novocheryomushkinskaya, 69, Russia
** Moscow State University, Department Biological, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

GIS-approach is used for the estimation of the carbon balance of the typical subarctic tundra landscape. Main parts of the created GIS are: 1) a computer map of tundra ecosystems borders, 2) database on diurnal weather parameters, 3) a model of aboveground plant biomass dynamics, 4) a simulation model of carbon fluxes. Seasonal carbon fluxes (gross respiration, gross primary production, net flux) are estimated for ecosystems of the tundra landscape. Seasonal carbon balance (June—September) of the landscape is found to be close to zero. Computer experiment simulated the influence of temperature and cloudiness changes on carbon balance of the typical subarctic tundra landscape.

Carbon balance, tundra, landscape, geographic-information system, global change

ВВЕДЕНИЕ

Геоинформационный подход в науках о Земле, как правило, используется при интеграции карт и баз данных для крупных регионов, например, стран или природных зон. Однако указанный подход может быть полезным и в исследованиях ландшафтного уровня. Известно, что разные типы тундровых биогеоценозов имеют различные параметры углеродного баланса в пределах одного ландшафта. Биогеоценозы с бугорковым и кочкиарным микрорельефом часто выступают в качестве источника углерода для атмосферы, в то время как заболоченные депрессии и ложбины — его стока. Таким образом, характеристика углеродного баланса ландшафта невозможна без учета пространственной пред-

ставленности слагающих его биогеоценозов (за исключением проведения прямых определений углеродного баланса ландшафта микрометеорологическими или аэродинамическими методами).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В теплый период 1993 и 1994 гг. нами были проведены полевые исследования потоков углекислого газа в различных типах биогеоценозов типичных тундр в окрестностях бывшего Таймырского биологического стационара (Тарея, 73°15' N, 90°36' E). В каждом исследуемом биогеоценозе располагалось от 1 до 4 пробных пло-

щадей (в среднем 3), на которых с интервалом 7–15 дней проводились измерения потоков CO_2 камерным методом с применением портативного инфракрасного газоанализатора LiCor-6200. За сутки на каждой пробной площади производилось около 24 замеров, интегрированием мгновенных величин рассчитывали суточные величины потоков. Растительный покров при измерениях не срезался, таким образом, регистрировались чистый поток углерода (NF) в прозрачной камере, валовое дыхание биогеоценоза (GR) в затемненной камере и по их разности рассчитывалась валовая первичная продукция (GPP). Поскольку GR и GPP являются разнонаправленными потоками, им были присвоены разные знаки, а именно, знак „плюс“ — дыханию, и „минус“ — продукции. Величина NF может иметь разный знак, являясь отрицательной для стока углерода и положительной для его источника. Суточные углеродные потоки для каждой измеренной пробной площади рассчитывались интегрированием данных по суточной динамике (не менее 20 замеров за сутки). Комплекс полевых работ включал в себя также регистрацию погодных характеристик, динамики глубины активного слоя, определения надземной фитомассы, влажности почвы и прочих экологических параметров.

Рельеф, климат, растительность и почвы района исследований детально описаны в ряде известных работ [Биогеоценозы ..., 1971; Матвеева, 1977 и др.]. Остановимся подробнее на растительности биогеоценозов, в которых измерялись потоки CO_2 , а именно, дриадово-осоково-моховой мелкобугорковой тундры и полигонального тундрово-болотного комплекса. Растительные ассоциации этих биогеоценозов разделяются на микропрепарации, приуроченные к формам микрорельефа [Матвеева, 1977]. Бугорки покрыты кустарничково-мохово-лишайниковыми сообществами, западины между ними заняты осоково-моховыми ассоциациями. Полигональный комплекс состоит из трех частей, включающих кустарничково-травяно-моховую ассоциацию в центральных частях полигонов, закраины вокруг центральных частей полигонов, поросшие кустарником, и осоково-пушицево-

моховую ассоциацию в заболоченных трещинах вокруг полигонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полевые исследования. Проведенные полевые работы позволили получить данные по балансу CO_2 для основных типов тундровых биогеоценозов со следующими растительными группировками: кустарниковой, кустарничковой, кустарничково-травяной, осоковой и пушицево-осоковой. В табл. 1 приведены величины суточных углеродных потоков, усредненные по всем пробным площадям, измеренным за два полевых сезона в данном биогеоценозе (период измерений составлен из краевых дат измерений без учета года). Можно отметить, что разные биогеоценозы характеризуются различными измеренными величинами валового дыхания, валовой продукции и чистого потока.

Геоинформационный подход. Для ландшафтной характеристики углеродного цикла был использован геоинформационный подход. Основными частями построенной ГИС являлись: 1) компьютерная карта границ тундровых биогеоценозов; 2) база данных по суточным погодным параметрам; 3) модель сезонной динамики надземной фитомассы; 4) имитационная модель углеродных потоков.

В качестве топографической основы для компьютерной карты послужила опубликованная Н. В. Матвеевой (1978) геоботаническая карта растительных ассоциаций (биогеоценозов) окрестностей Таймырского стационара. Карта охватывает площадь 23,5 км² и включает границы биогеоценозов, озер и рек. Сопоставление с нынешними (1994 г.) границами ассоциаций показало отсутствие существенных изменений и пригодность карты для современных оценок. Компьютерное отображение карты было осуществлено в системе IDRISI.

Исходный вариант карты включает 36 типов растительных ассоциаций. Однако подавляющее большинство из них являются комплексными и могут быть представлены как комбинации небольшого числа более простых гомогенных ассоциаций. Пять из этих простейших ассоциаций

Таблица 1. Средние величины потоков углекислого газа в различных формах микрорельефа ландшафта типичной тундры (Северо-Западный Таймыр) в 1993–1994 гг.

Форма микрорельефа	Группировка растительности	Период измерений	Кол-во пробных площадей	Потоки CO_2 , $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$		
				валовое дыхание	валовая продукция	чистый поток
Бугорки	Кустарничковая	10.VII–14.IX	22	1,066	-0,747	0,319
Низины	Осоковая	10.VII–14.IX	24	1,598	-1,899	-0,300
Центры полигонов	Кустарничково-травяная	27.VII–11.IX	16	1,829	-2,186	-0,357
Закраины полигонов	Кустарниковая	27.VII–11.IX	6	1,670	-1,807	-0,137
Трещины	Осоково-пушицевая	23.VII–11.IX	10	1,702	-2,543	-0,841

(кустарниковая, кустарничковая, кустарничко-в-травяная, осоковая и пушицеово-осоковая) формируют практически все разнообразие экосистем типичной субарктической тундры в районе Тареи. Подробности методики пересчета состава 36 типов биогеоценозов через простейшие ассоциации приведены в специальной работе [Карелин и др., 1996].

Как известно, величины потоков CO_2 в значительной степени зависят от погодных условий. Непосредственно для района исследований мы располагали метеоданными только по дням проведения измерений газовых потоков. Для восстановления сезонной динамики были использованы данные Росгидрометцентра по стационарным метеостанциям. Они включали температуры воздуха и показатели облачности (фиксируемые в 4.00, 10.00, 16.00 и 22.00 по местному времени) с 1 мая по 31 октября за 1993—1995 гг.

К сожалению, все метеостанции (мыс Челюскин, мыс Стерлигова, оз. Таймыр, о. Диксон, Хатангга), по которым мы располагали данными, были сильно удалены от района исследований. Для выявления наиболее пригодной из них был проведен сравнительный анализ данных по всем станциям и по нашим наблюдениям. Станция Хатангга ($72^{\circ}0' \text{ N}$, $102^{\circ}30' \text{ E}$) показала наиболее близкую к измеренной нами динамику погодных параметров.

Сложной вспомогательной задачей оказалась аппроксимация сезонной динамики фотосинтетически-активной радиации (PAR). Показатели облачности в метеосводках варьируют от 0 (отсутствие облаков) до 10 (сплошная облачность) и не могут служить прямой оценкой сезонных вариаций солнечной радиации. Для восстановления динамики PAR нами были использованы методы отечественной метеорологии [Берлянд, 1961; Соколихина, 1994].

Регрессионный анализ показал, что восстановленные и измеренные величины температуры воздуха и PAR изменяются сходным образом, однако свободные члены уравнений являются значимыми. Поэтому прямое использование восстановленных данных в модельных уравнениях, аппроксимированных по исходным погодным данным, могло привести к систематическим ошибкам. Для удаления последних идентификация параметров уравнений, имитирующих величины потоков CO_2 , проводилась с использованием восстановленных значений погодных характеристик.

Восстановление сезонной динамики надземной фитомассы проводилось главным образом на основе наших данных по укосам с пробных площадок. Подробная информация по составу фракций в укосах, описание методов аппроксимации динамики фитомассы и принятых допущений приведены в работе [Карелин и др., 1996]. В

результате были полностью восстановлены кривые динамики основных компонентов фитомассы по всем пяти типам ассоциаций в течение вегетационного („теплого“) сезона 1994 г.

По глубине оттаивания почвы мы располагали достаточной информацией во всех ассоциациях за период полевых работ в 1994 г. Момент начала оттаивания почвы был определен по климатическим данным. Последние измерения глубины оттаивания были выполнены в начале промерзания поверхности почвы (около 10 сентября). Средняя глубина оттаивания почвы в это время составляла 41 см.

Мы не располагали достаточной информацией по динамике фитомассы и глубины оттаивания в 1993 и 1995 гг. и поэтому использовали данные 1994 г., изменив на основе метеоданных даты начала и конца теплого сезона. Очевидно, что точность восстановления динамики в этом случае ниже, чем для 1994 г. В большей степени это касается глубины оттаивания, для которой характерны значительные межгодовые флуктуации.

Уравнения потоков CO_2 были идентифицированы на основе эмпирических значений потоков CO_2 (GR , GPP , NF , $\text{гC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), фитомассы (GV — листья сосудистых растений, WSH — древесная часть кустарников и кустарничков, MM — масса мхов, ML — масса лишайников; $\text{г сухого вещества} \cdot \text{м}^{-2}$), и глубин оттаивания (TD , см), а также восстановленных значений средней, минимальной и максимальной температуры воздуха за сутки (T_{avg} , T_{\min} , T_{\max} , $^{\circ}\text{C}$) и PAR ($\text{МДж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$). Подробное рассмотрение методики и результатов регрессионного анализа осуществлено в работе [Замолодчиков и др., 1997]. Поэтому здесь мы приведем лишь итоговые формы уравнений, полученные на основе анализа парных взаимодействий каждой из независимых переменных с GV или TD при использовании пошаговой регрессии с уровнем значимости 0,2:

$$GR = 0,001 TD (66,825 - 0,028 ML + \\ + 0,140 GV - 1,661 TD + 2,173 T_{\min} + 2,126 PAR),$$

$$R^2 = 0,940, n = 82, P < 0,001; \quad (1)$$

$$GPP = 0,001 GV (-37,253 + 0,107 WSH +$$

$$+ 0,012 MM + 0,092 ML + 0,163 GV -$$

$$- 1,704 T_{\min} + 3,453 T_{\max} - 4,064 PAR),$$

$$R^2 = 0,912, n = 82, p < 0,001; \quad (2)$$

$$NF = 0,001 GV (0,120 WSH +$$

$$+ 0,018 MM + 0,096 ML + 2,809 T_{\max} - 3,187 PAR),$$

$$R^2 = 0,649, n = 82, p < 0,001. \quad (3)$$

Как видим, значения R^2 для уравнений, описывающих валовое дыхание и GPP , очень

высоки, и объясняют более 90 % вариации исходных данных. Показатель R^2 для уравнения чистого потока намного ниже, что объективно отражает большую комплексность этой величины.

Для всех независимых переменных была восстановлена посutoчная динамика с 1 мая по 31 октября за 1993—1995 гг. Это позволило вычислить суточные значения дыхания и продукции с помощью уравнений (1) и (2). Чистый поток может быть оценен с помощью уравнения (3) или как сумма дыхания и продукции. В период, когда почва находится в замерзшем состоянии (середина октября—начало июня), значения потоков были приравнены нулю.

При проверке расчетная динамика потоков углерода по имитационной модели показала удовлетворительное соответствие эмпирическим данным. Адекватность модели оценена на основе коэффициента несовпадения [Tyler, 1971]. Этот коэффициент варьирует от 0 в случае полного совпадения до 1 при полном несовпадении. Значения коэффициента несовпадения оказались равными 0,127 для дыхания, 0,101 для GPP и 0,198 — для чистого потока. Очевидно, что модель хорошо описывает процессы валового дыхания и валовой первичной продукции, при удовлетворительном описании чистого потока углерода.

Модель позволила рассчитать суммарные сезонные потоки CO_2 (от снеготаяния до полного промерзания почвы) для каждого из исследованных биогеоценозов (табл. 2). Чистый сезонный поток варьировал между ассоциациями от -51 (сток углерода; заболоченные трещины) до +57 (источник углерода; бугорки) $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$. Следует отметить несовпадение последовательности расположения биогеоценозов по убыванию величин дыхания и продукции в табл. 1 и 2. Это объясняется тем, что в табл. 1 представлены средние величины, оцененные по ограниченной случайной выборке измерений. Погодные и сезонные условия существенно варьировали в дни измерений, смещающая в различные стороны средние величины. Величины табл. 2 представляются более устойчивыми, поскольку включают типовой расчет по всем биогеоценозам для всех суток теплого сезона.

Таблица 2. Суммарные сезонные углеродные потоки в биогеоценозах типичной субарктической тундры по результатам моделирования (Таймырский стационар; начало июня—начало октября 1994 г.)

Растительная группировка биогеоценоза	Потоки CO_2 , $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$		
	валовое дыхание	валовая продукция	чистый поток
Кустарничковая	134	-77	57
Кустарничково-осоковая	157	-184	-26
Осоковая	159	-180	-21
Кустарниковая	165	-161	4
Осоково-пушициевая	182	-233	-51

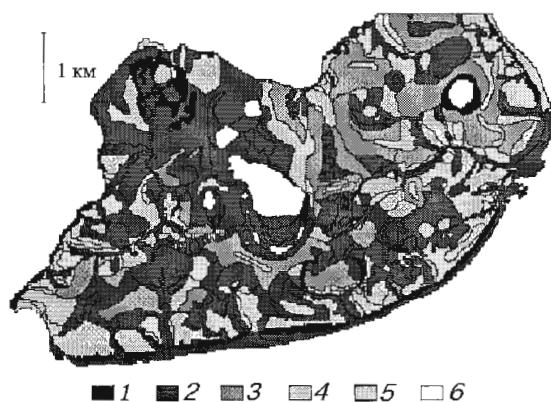


Рис. 1. Карта сезонного чистого потока CO_2 в ландшафте типичной субарктической тундры Северо-Западного Таймыра.

Градации чистого потока ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$): 1 — -55 — -30; 2 — -30 — -5; 3 — -5—5; 4 — 5—30; 5 — 30—55; 6 — озера.

Как отмечалось выше, тундровые биогеоценозы исследуемого района были представлены как комбинации простейших ассоциаций, что дало возможность оценить суточные и сезонные ландшафтные потоки CO_2 на основе имитационных моделей и компьютерной карты границ биогеоценозов. Реконструированный таким образом ландшафт типичной субарктической тундры оказался представленным участками, имеющими устойчивый положительный, либо отрицательный сезонный углеродный баланс (рис. 1).

Участки, имеющие отрицательный баланс, заняты болотами и тундрово-болотными полигональными комплексами; участки с положительным сезонным балансом — это главным образом зональные тундровые экосистемы с мелкобугровым или кочкарным микрорельефом, расположенные на локальных повышениях. ГИС дает возможность построить карты сезонных величин валового дыхания и валовой продукции, а также суточного распределения этих характеристик. Суммарные сезонные потоки (июнь—сентябрь) для 1994 г. составили (в $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$): валовая первичная продукция -149, валовое дыхание +145,

чистый поток -4 . Таким образом, для этого периода потоки CO_2 в ландшафте типичных тундр Таймыра были сбалансированы.

Модель позволила рассчитать величины баланса CO_2 в 1993 и 1995 гг., равные для GR : $+154$ и $+175$, для GPP : -162 и -176 , для NF : -8 и $+1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ соответственно. За три года отмечается небольшой тренд чистого потока углерода от стока в 1993 г. к его источнику в 1995 г., который совпадает с трендом к увеличению средних температур теплого сезона (июнь—август) за то же время: $7,5$, $8,2$ и $9,8^\circ\text{C}$. Однако короткий период имитации не дает возможности сделать заключение о многолетних тенденциях в динамике баланса CO_2 тундр Таймыра.

Компьютерный эксперимент. Одной из особенностей примененного подхода является то, что мы не использовали никаких исходных постулатов относительно формы влияния различных факторов. Полученные уравнения (1)—(3) отражают связь между углеродными потоками и реально действующими экологическими факторами. Это позволяет обратиться к компьютерным экспериментам с моделями, изменяя входные данные. Ответ модели при этом не будет триизвильным или предопределенным начальной формой уравнений.

Нами был проведен компьютерный эксперимент, имитирующий одновременное изменение температуры и облачности. В эксперименте

изменяли на фиксированную величину значения исходных погодных параметров (т. е. среднесуточной температуры и облачности), и далее проводили расчет для всего теплого периода по новым значениям. Имитация показывает (рис. 2), что рост среднесуточной температуры воздуха теплого периода на 1°C при неизменной облачности ведет к отклонению углеродного баланса в положительную область приблизительно на $20 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$. Однако одновременное понижение облачности на 1 балл полностью компенсирует отнесенное влияние температуры. В то же время одновременное повышение облачности на один балл и температуры на один градус приводит к потере уже $27 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Результаты компьютерной имитации подтверждают известную гипотезу о положительной обратной связи между потеплением климата и превращением тундр в источник углерода для атмосферы. Это положение подкреплено многочисленными наблюдениями и в других регионах мировой тундры [Зимов и др., 1991; Замолодчиков и др., 1996; Oechel et al., 1993; 1995]. Следует отметить, что выводы компьютерного эксперимента справедливы только в том случае, если не происходит изменений структуры и функций биогеоценозов, а также площадных соотношений между ними. В ходе реального потепления некоторые процессы (увеличение заболоченных площадей за счет термокарста, зарастание озерных мелководий, изменение видовой структуры сообществ в процессе сукцессий и др.) могут привести к противоположным результатам.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании мы моделировали суммарный сезонный поток углерода для периода от начала снеготаяния до полного промерзания почвы. Строго говоря, эта величина не полностью соответствует годичному потоку, поскольку в ней не учтена эмиссия CO_2 из почвы в холодный период года [Зимов и др., 1991; Zimov et al., 1993; Oechel et al., 1995]. Для оценки величины „зимнего“ потока углерода можно вновь обратиться к данным по влажной осоковой тундре на Аляске. Объем эмиссии CO_2 в течение холодного сезона (включая период промерзания почвы) здесь составляет $19 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Величина, равная $10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, уже была включена нами в общий сезонный показатель для периода промерзания почвы. Поэтому неучтенная величина эмиссии также составляет около $10 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Отсюда общий годичный баланс углерода в ландшафтах типичной субарктической тундры следует оценивать как близкий к динамическому равновесию в 1993 г. и положительный — в 1994 и 1995 гг. Существенно более низкие зимние температуры на Таймыре

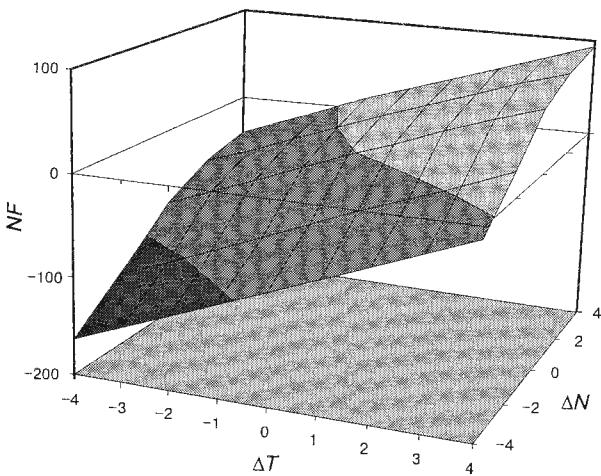


Рис. 2. Компьютерная имитация влияния климатических изменений (температуры воздуха и облачность) на чистый сезонный поток CO_2 в ландшафте типичной тундры Таймыра.

ΔT — изменение среднесезонной температуры воздуха ($^\circ\text{C}$), ΔN — изменение среднесезонной облачности (баллы), NF — чистый поток ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{сезон}^{-1}$).

должны способствовать и более низким значениям эмиссии CO_2 по сравнению с Аляской. Однако окончательную ясность могут внести только прямые измерения потоков CO_2 на Таймыре в зимний период.

Полученные в результате моделирования оценки не противоречат данным по влажной осоковой тундре северного побережья Аляски (США), которой посвящено большое количество работ [Coyne et al., 1975; 1978; Miller et al., 1976; Oechel et al., 1993; 1995; и др.]. Например, GPP осоковой тундры оценена как $160 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Miller et al., 1976], что хорошо согласуется с нашей аналогичной ландшафтной оценкой ($149 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$). Диапазон вариации чистого потока CO_2 по цитируемым работам в среднем составляет от -40 до $+34 \text{ gC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Coyne et al., 1975; Miller et al., 1983; Oechel et al., 1993; 1995] с максимумом для стока $-109 \text{ gC} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ [Chapin et al., 1980]. Этот диапазон близок к полученному нами для различных ассоциаций (см. табл. 2).

Будущее работы прочно связано с использованием геоинформационного подхода, позволяющего получить целостную ландшафтную оценку характера углеродного баланса. Модельные значения углеродных потоков существенно варьируют в различных биогеоценозах (см. табл. 2). Если бы измерения газовых потоков проводились только на бугорках, то в результате мы получили бы эмиссию (источник) углерода из тундры в атмосферу, а в случае исследования только полигонов — сток углерода. Геоинформационная система, созданная на основе компьютерной карты основных растительных сообществ, позволяет избежать таких неточностей и корректно оценить углеродный баланс ландшафта в целом.

Работа выполнена в рамках программы проекта 4.3.3 ГНТП 18 „Глобальные изменения природной среды и климата“. Полевые работы финансировались грантами R7 Государственного департамента СА и MSG000 Международного научного фонда.

Авторы благодарны С. Хастингсу (Сан-Диего, США), Л. А. Колпащикову и С. С. Мамулову (Норильск), В. В. Зеленеву и М. В. Глаголеву (Москва) за помощь в выполнении исследования.

Литература

Берлянд Т. Г. Распределение солнечной радиации на континентах. Л., Гидрометеоиздат, 1961, 226 с.

- Биогеоценозы Таймырской тундры и их продуктивность / Ред. Б. А. Тихомиров, Л., Наука, 1971, 240 с.
- Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Обратимый сдвиг углеродного баланса южных тундр в сторону эмиссии CO_2 при краткосрочном повышении суточной температуры // Фундаментальные исследования криосферы Земли в Арктике и Субарктике (итоги и перспективы). Пущино, ПНЦ РАН, 1996, с. 148—151.
- Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В., Иващенко А. И. Углеродный баланс тундровых ландшафтов Центральной Сибири: наблюдения и моделирование на геоинформационной основе // Журн. общ. биологии, 1997, т. 58, № 2, с. 15—34.
- Зимов С. А., Давыдов С. П., Просянников С. Ф. и др. Почвы Севера — генератор углекислоты // Вестн. АН СССР, 1991, № 8, с. 71—83.
- Карелин Д. В., Иващенко А. И., Замолодчиков Д. Г. Геоинформационный подход в изучении сезонной динамики надземной фитомассы арктических экосистем: мода или необходимость? // Журн. общ. биологии, 1996, т. 57, № 5, с. 608—627.
- Матвеева Н. В. Растительность окрестностей Таймырского биологического стационара // Структура и функции биогеоценозов таймырской тундры. Л., Наука, 1977, с. 72—113.
- Соколихина Н. Н. Распределение облачности и оценка ее влияния на приход суммарной радиации в Якутии // Вестн. МГУ, сер. 5, география, 1994, № 5, с. 96—101.
- Chapin F. S., III., Miller P. C., Billings W. D., Coyne P. I. Carbon and nutrient budgets and their control in coastal tundra // An Arctic ecosystem: the coastal tundra at Barrow, Alaska / Eds. J. Brown, P. C. Miller, L. L. Tieszen, F. L. Bunell. Strousberg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 1980, p. 458—482.
- Coyne P. I., Kelley J. J. CO_2 exchange over the Alaskan Arctic Tundra: meteorological assessment by an aerodynamic method // J. Applied Ecology, 1975, v. 12, p. 587—611.
- Coyne P. I., Kelley J. J. Meteorological assessment of CO_2 exchange over an Alaskan Arctic Tundra // Vegetation and Production Ecology of an Alaskan Arctic Tundra / Ed. L. L. Tieszen. N.-Y., Springer-Verlag, 1978, p. 299—321.
- Miller P. C., Stoner W. A., Tieszen L. L. A model of stand photosynthesis for the wet meadow tundra at Barrow, Alaska // Ecology, 1976, v. 57, p. 411—430.
- Oechel W. C., Hastings S. J., Jenkins M. et al. Recent change of arctic tundra ecosystems from a carbon sink to a source // Nature, 1993, v. 361, p. 520—523.
- Oechel W. C., Vourlitis G. L., Hastings S. J., Bochkarev S. A. Change in arctic CO_2 flux over two decades: effects of climate change at Barrow, Alaska // Ecological Application, 1995, 5(3), p. 846—855.
- Tyler G. Distribution and turnover of organic matter and minerals a shore meadow ecosystem. Studies in the ecology of Baltic sea-shore meadows. IV // Oikos, 1971, v. 22, № 3, p. 265—291.
- Zimov S. A., Zimova G. M., Davidov S. P. et al. Winter biotic activity and production of CO_2 in Siberian soils: A factor of greenhouse effect // J. Geophys. Res., 1993, v. 98, p. 5017—5023.

Поступила в редакцию
1 июля 1997 г.

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАНДШАФТНАЯ ОСНОВА ЦИРКУМПОЛЯРНЫХ КАРТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОДЕРЖАНИЯ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Е.С. Мельников, Л.А. Конченко, Л.С. Молчанова

Институт криосферы Земли СО РАН, 117982, Москва, ул. Вавилова, 30/6, комн. 74а, Россия

В Институте криосферы Земли СО РАН изготовлена электронная ландшафтная карта для территории Российской Арктики в масштабе 1:7 500 000. На карте показаны зональные, подзональные и высотно-поясные типы и подтипы ландшафтов, морфогенетические группы и виды ландшафтов с различным составом их литогенной основы. Эта карта может служить основой экологических карт различного содержания, составляемых с использованием геосистемного (ландшафтного) принципа построения. При создании карты использовались современные программные средства, применяемые в Геоинформационных системах (ГИС).

Ландшафты криолитозоны, Российская Арктика, электронные карты, геоинформационные системы

ELECTRONIC LANDSCAPE BASIS OF ECOLOGICAL CIRCUMPOLAR MAPS FOR RUSSIAN ARCTIC

E.S. Mel'nikov, L.A. Konchenko, L.S. Molchanova

Earth Cryosphere Institute SB RAS 117982, Moscow, Vavilov st., 30/6, Room 74a, Russia

An electronic landscape map for the territory of Russian Arctic at a scale of 1:7 500 000 has been compiled at the Earth Cryosphere Institute SD RAS. The map shows zonal, subzonal and altitude-zonal landscape types and subtypes, morphogenetic groups and landscape varieties with different composition of their lithogenic base. This map may be used as the basis for ecological maps of different profiles compiled on the geosystem (landscape) principle. The map was produced through modern computer software used in the Geoinformation Systems (GIS).

Landscapes of the cryolithozone, Russian Arctic, electronic maps, geoinformation Systems

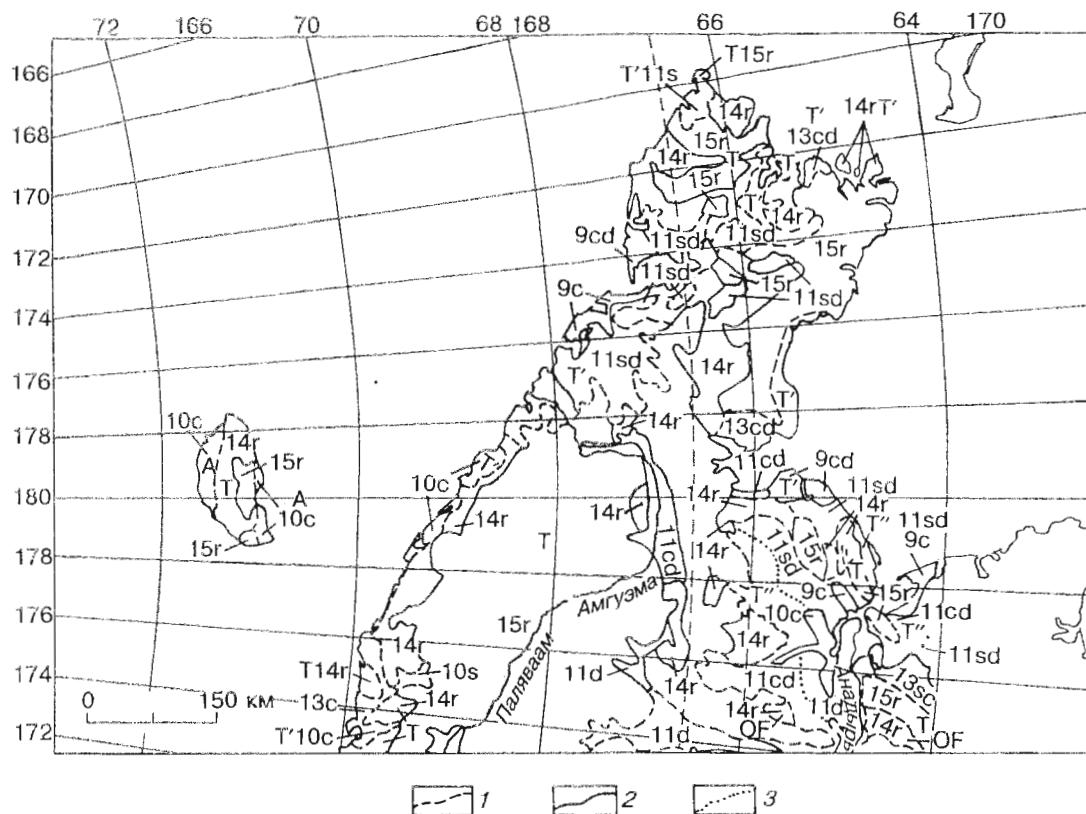
ВВЕДЕНИЕ

Ландшафты Арктики и Субарктики весьма чувствительны к естественным изменениям климата и разного рода техническим воздействиям. В связи с этим особую актуальность приобретают вопросы изучения динамики геоэкологической ситуации северных регионов, которая в первую очередь зависит от изменений ландшафтных условий. Ландшафтные карты могут служить хорошей контурной основой для картографического отображения разного рода потенциальных или произошедших изменений геоэкологических условий. В Институте криосферы Земли СО РАН изготовлена ландшафтная основа мелкомасштабных карт экологического содержания для территории Российской Арктики в масштабе 1:7 500 000. Показанные на ней ландшафтные выделы можно увязать в первую очередь с различными параметрами криолитозоны, а затем на этой основе создать серию разных карт геоэкологического содержания. Смысловая нагрузка ландшафтной основы отражает максимальную степень дифференциации ландшафтов, показ ко-

торой возможен в данном мелком масштабе. При составлении геоэкологических карт ландшафтная контурная основа обычно упрощается в зависимости от назначения этих карт и методики их составления.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

При создании электронной ландшафтной карты использовались разные программные средства. Программа Map Edit применялась для векторизации элементов карты. Последующая обработка материалов для получения окончательной композиции карты проводилась с помощью программных пакетов GeoDraw и ГеоГраф. Эти программные пакеты обеспечивают экспорт композиции карты в формат DXF, который, в свою очередь, позволяет импортировать данные в систему ARC/INFO и другие, применяемые в геоинформационных системах (ГИС). В результате использования перечисленных программных



Фрагмент ландшафтной карты территории Российской Арктики масштаба 1: 7 500 000 и легенда к нему.

I. Зональные, подзональные и высотно-поясные типы и подтипы ландшафтов

На равнинах: А — арктические (полярные) пустынные; Т' — северотундровые и типичнотундровые; Т'' — южнотундровые.
В горах: Т — горнотундровые; ОФ — горноредколесные.

II. Морфогенетические группы и виды ландшафтов

Горно-складчатые области: ландшафты межгорных и внутригорных впадин, предгорных равнин и предгорий: 9 — морские; 10 — аллювиальные, озерные и озерно-аллювиальные; 11 — ледниковые и водно-ледниковые; 13 — аккумулятивные нерасчлененные; 14 — эрозионно-денудационные; 15 — ландшафты горных сооружений (низкие, средние и высокие горы).

III. Тип литогенной основы ландшафтов

р — торфяный; с — глинистый; s — песчаный; d — крупнообломочный; г — скальный и полускальный (нерасторимые породы).*

IV. Границы

1 — зональных, подзональных и высотно-поясных типов и подтипов ландшафтов;

2 — морфогенетических видов ландшафтов; 3 — типов литогенной основы ландшафтов.

* Примечание. Сочетание буквенных символов обозначает: смешанный состав нелитифицированных пород (cs); состав нелитифицированных пород, залегающих на скальных или полускальных породах (с/г).

средств была создана мелкомасштабная электронная ландшафтная карта, позволяющая путем пространственных операций с разными данными составлять обзорные карты экологического содержания (геоботанические, почвенные, геокриологические и другие).

Ландшафтная основа оцифрована в равно-великой азимутальной полярной проекции Лам-

берта, которая обычно применяется для околоводяных территорий. Равновеликость проекции обеспечивает сохранение пропорциональности площадей проекции и земной поверхности. С использованием данной проекции ранее для территории России были составлены Геокриологическая карта масштаба 1:10 000 000 (как часть международной циркумполярной карты) и Карта

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАНДШАФТНАЯ ОСНОВА ЦИРКУМПОЛЯРНЫХ КАРТ

криогенных геологических процессов масштаба 1: 7 500 000.

При составлении ландшафтной основы использовались изданные карты: ландшафтные, масштаба 1: 2 500 000 и 1: 4 000 000 (под ред. И.С. Гудилина, А.Г. Исаченко), четвертичных отложений, масштаба 1: 2 500 000 и 1: 5 000 000 (под ред. Г.С. Ганешина) и другие карты, разные опубликованные работы, результаты дешифрирования космоснимков, а также материалы многолетних исследований института ВСЕГИНГЕО на севере Западно-Сибирской низменности и в пределах приморских низменностей Якутии.

Главным источником информации для составления ландшафтной основы послужила Ландшафтная карта СССР под редакцией И.С. Гудилина [Ландшафтная..., 1980]. Это наиболее детальная ландшафтная карта СССР. На ней помимо широтно- и высотно-зональных типов и подтипов ландшафтов выделены 1019 их родов [Легенда..., 1987]. Однако при подобной детальности карта все же не содержит важную информацию о составе четвертичных отложений. Поэтому одновременно с типизацией ландшафтных контуров в основу была введена и эта информация. От такой карты проще можно перейти к отображению особенностей распространения и свойств многолетнемерзлых горных пород (это осуществлено в виде Геокриологической карты России и Монголии масштаба 1:10 000 000, составленной в 1993 г.). С учетом этой карты ландшафтную основу можно использовать для составления геэкологических карт разного содержания, в том числе и прогнозных геэкологических карт. Именно при таком методологическом подходе ландшафтная основа будет служить связующим звеном разных карт экологического содержания, делая их сопоставимыми и давая возможность помимо картографирования статической природной обстановки оценивать динамику природных условий, составлять различные прогнозные карты [Мельников, 1985].

СОДЕРЖАНИЕ КАРТЫ

Закартированная территория ограничена с юга 64 °С с. ш. в соответствии с границами, принятыми для других мелкомасштабных циркумполярных карт экологического содержания (Геологической, Карты четвертичных отложений). Эта территория превышает площадь собственно Арктики. В ее пределах, на Европейском Севере, помимо зоны распространения многолетнемерзлых пород развита также зона сезонномерзлых пород. Граница распространения многолетнемерзлых пород проведена в соответствии с Картою криогенных физико-геологических про-

цессов криолитозоны России масштаба 1:7 500 000, составленной в Институте криосферы Земли СО РАН в 1996 г.

Содержание ландшафтной основы образуют зональные, подзональные и высотно-поясные типы и подтипы ландшафтов, морфогенетические группы и виды ландшафтов.

На равнинах выделяются шесть зональных и подзональных типов и подтипов ландшафтов: арктические (полярные) пустынные, северотундровые и типичнотундровые, южнотундровые, лесотундровые, северотаежные, среднетаежные.

В горах показаны два высотно-поясных типа ландшафтов: горнотундровые, горноредколесные.

Морфогенетические группы и виды ландшафтов выделяются особо в пределах платформенных областей и в пределах горно-складчатых областей.

В пределах платформенных областей по гипсометрическому положению выделены три морфогенетические группы ландшафтов: ландшафты низменных равнин, созданные преимущественно новейшими опусканиями, ландшафты высоких равнин и плато с преобладанием пологих новейших поднятий, ландшафты плато, плоскогорий и кряжей с преобладанием новейших сводовых и блоковых поднятий.

Среди первых двух групп ландшафтов платформенных областей в пределах аккумулятивных равнин по генезису слагающих их отложений различаются морфогенетические виды ландшафтов: морские и ледово-морские, аллювиальные, озерные и озерно-аллювиальные, ледниковые и водно-ледниковые, аккумулятивные нерасчлененные.

В пределах горно-складчатых областей обособлены две морфогенетические группы ландшафтов: межгорных и внутригорных впадин, предгорных равнин и предгорий, собственно горных сооружений.

Среди аккумулятивных равнин межгорных и внутригорных впадин и наложенных предгорных равнин по генезису слагающих их отложений различаются следующие морфогенетические виды ландшафтов: морские, аллювиальные, озерные и озерно-аллювиальные, ледниковые и водно-ледниковые, делювиальные, аллювиально-пролювиальные и солифлюкционные, аккумулятивные нерасчлененные.

Всего, включая эрозионно-денудационные формы рельефа, обособлено 15 морфогенетических видов ландшафтов.

На карте показаны шесть различных типов литогенной основы ландшафтов, из них четыре — для рыхлых отложений (торфяный, глинистый, песчаный и крупнообломочный типы) и два — для скальных и полускальных пород (расторимые и нерасторимые породы). Фрагмент

ландшафтной карты Чукотской горно-складчатой области приводится на рисунке.

Таким образом, дифференциация ландшафтов Российской Арктики и прилегающей к ней территории показана в комбинации с различными типами литогенной основы. Ландшафтная структура территории отражена с максимальной для данного масштаба детальностью. При использовании ландшафтной основы для составления карт экологического содержания может быть проведена необходимая генерализация контуров в зависимости от содержания этих карт, масштаб карты может быть трансформирован в пределах масштабов от 1:2 500 000 до 1:10 000 000.

Литература

- Ландшафтная карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. И.С. Гудилина. Л., ВСЕГЕИ, 1980, 16 листов.
Легенда к ландшафтной карте СССР масштаба 1:2 500 000. М., Гидроспецгеология, 1987, 340 с.
Мельников Е.С. Научные основы и методы региональных инженерно-геологических исследований равнин криолитозоны (на примере Западной Сибири) // Автореф. дис. ... д-ра геол.-минер. наук, М., 1985, 44 с.

*Поступила в редакцию
12 июня 1997 г.*

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 4, с. 89—90

ХРОНИКА

**Михаил Иванович СУМГИН —
основоположник науки о мерзлых толщах земной коры
(к 125-летию со дня рождения)**



М. И. Сумгин родился 25 февраля 1873 г. в мордовской деревне Крапивки Лукояновского уезда Нижегородской губернии. В 1895 г. он поступил в Санкт-Петербургский университет. За участие в забастовке студентов в 1899 г. М. И. Сумгин был исключен из университета и выслан из Петербурга. В последующие годы он совмещал работу с активной революционной деятельностью, за что неоднократно подвергался арестам и был сослан в Тобольскую губернию.

В 1911 г. М. И. Сумгин получил приглашение заведовать метеорологической станцией Бомнак в Амурской области. По приезде на Дальний Восток он попал в коллектив почвоведов, агрономов и ботаников, деятельность которых была связана с изучением влияния вечной мерзлоты на почвообразование и развития растений. Работа М. И. Сумгина на метеорологической станции и, позднее, в метеорологическом бюро Амурского переселенческого района вы-

звали у него повышенный интерес к изучению вечной мерзлоты.

В конце 20-х гг. М. И. Сумгин переехал в Ленинград. Здесь он работал в автодорожном институте, читал лекции и проводил исследования миграции влаги, пучения и других процессов, происходящих в промерзающих грунтах.

В это же время он обратился в академию наук СССР с ходатайством об организации при Академии Центра по всестороннему изучению вечной мерзлоты. Ходатайство М. И. Сумгина было поддержано академиками В. И. Вернадским и В. А. Обручевым. В 1930 г. при Академии наук СССР была образована Комиссия по изучению вечной мерзлоты под председательством акад. В. А. Обручева. М. И. Сумгин был назначен его заместителем. С образованием этого научного центра широко развернулся организаторский талант М. И. Сумгина.

Комиссией были проведены крупные работы по исследованию вечной мерзлоты в связи с

изысканиями и строительством железных дорог на Востоке страны и в некоторых других районах. Собранные материалы значительно обогатили наши знания о природе вечной мерзлоты, а выполненные в то же время лабораторные работы положили начало созданию механики мерзлых грунтов.

В 1936 г. Комиссия была реорганизована в Комитет по изучению вечной мерзлоты. Руководителем комитета стал акад. В. А. Обручев, а его заместителем — М. И. Сумгин. Комитет приступил к организации стационарных исследований в районах распространения вечной мерзлоты и решению задач дорожного и гражданского строительства. Одновременно накапливались данные для теоретических обобщений.

В 1939 г. Комитет по изучению вечной мерзлоты был преобразован в Институт мерзлотоведения АН СССР им. В. А. Обручева. Директором института стал акад. В. А. Обручев, а М. И. Сумгин — его заместителем. Начатые ранее стационарные исследования значительно расширились. Институт организовал ряд постоянно действующих мерзлотных станций, сеть которых охватывала основные природные зоны Севера и была приурочена к районам начавшегося промышленного освоения. Работа мерзлотных станций обеспечила круглогодичное изучение процессов, свойств и состояния вечной мерзлоты и позволила оперативно решать на месте инженерные задачи.

В 1937 г. была опубликована книга М. И. Сумгина „Вечная мерзлота почвы в пределах СССР“, в которой были обобщены все проведенные им наблюдения и литературные сведения. В этой книге были сформулированы основы мерзлотоведения — нового научного направления, получившего в последующие годы название „геокриология“. В 1937 г. М. И. Сумгин совместно с Н. А. Цытовичем опубликовал капитальный труд „Основы механики мерзлых грунтов“, заложивший научные основы инженерного мерзлотоведения. В 1940 г. М. И. Сумгин совместно со своими соратниками и учениками (Н. И. Толстикhin, С. П. Качурин и В. Ф. Тумель) опубликовал первый учебник „Общее мерзлотоведение“.

Великая Отечественная война приостановила многие начинания М. И. Сумгина. Он вынужден был переехать в Ташкент, где приступил к исследованиям сезонной мерзлоты почв в Средней Азии.

Но силы Михаила Ивановича таяли. Он был тяжело болен. Сказалась и контузия, полученная накануне отъезда из Москвы во время бомбежки. 8 декабря 1942 г. Михаила Ивановича не стало.

М. И. Сумгин оставил обширное и многостороннее научное наследие, а высказанные им идеи и заветы способствовали дальнейшему плодотворному развитию мерзлотоведения.