

PERMAFROST  
DEGRADATION UNDER  
POSSIBLE GLOBAL  
CLIMATIC WARMING

E. D. ERSHOV

*Using contemporary geocryological methods, a mathematical simulation of the process of the permafrost degradation under various geological and geographic conditions have been made, a map of geocryological forecast of Russia has been compiled for the 110th year from the beginning of possible global climatic warming that occurred due to an increase in the "greenhouse" gas contents in the atmosphere.*

**Основываясь на комплексе современных геокриологических методов, выполнено математическое моделирование процесса деградации мерзлоты для различных геолого-географических условий и составлена прогнозная геокриологическая карта России на 110-й год от начала возможного глобального потепления климата за счет увеличения содержания парниковых газов в атмосфере.**

## ДЕГРАДАЦИЯ МЕРЗЛОТЫ ПРИ ВОЗМОЖНОМ ГЛОБАЛЬНОМ ПОТЕПЛЕНИИ КЛИМАТА

Э. Д. ЕРШОВ

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

Динамика мерзлоты определяется как естественноисторическим ходом развития природной обстановки, так и изменениями климата за счет воздействия антропогенного фактора, которое может проявляться в виде глобального потепления за счет, например, увеличения содержания парниковых газов в атмосфере. Анализ публикаций, посвященных реакции мерзлоты на возможное изменение климата, показывает, что часто для этой цели используют качественные методы прогноза (метод аналогий, экспертных оценок). В работах, где применяют количественные методы, не всегда четко сформулированы математические модели, а основной трудностью обычно является задание корректных начальных климатических и геокриологических условий.

Очевидно, что прогнозируемое повышение температуры воздуха за счет антропогенных факторов накладывается на естественноисторическую динамику климата. Анализ хода изменений среднегодовых температур воздуха, проведенный для многих пунктов криолитозоны России, показал, что ее возможные отклонения от современных значений за счет естественноисторических изменений значительно меньше, чем ожидаемое повышение температуры воздуха за счет антропогенного фактора на ближайшие 100 лет [2]. В настоящей статье представлены результаты оценки динамики криолитозоны России только за счет воздействия на атмосферу антропогенного фактора, проявившегося в виде возможного глобального потепления без учета естественноисторических изменений природной обстановки. Работа выполнена с целью установить пространственно-временные закономерности деградации криолитозоны и на их основе составить прогнозные геокриологические карты.

В настоящее время существуют несколько сценариев возможного изменения климата под влиянием антропогенных факторов [1, 3]. Нами использован сценарий, предложенный сотрудниками Института глобального климата и экологии РАН (ИГКЭ), согласно которому на территории криолитозоны России к 2100 году среднегодовая температура приземного воздуха повысится на 4–8°C в зависимости от географического положения района.

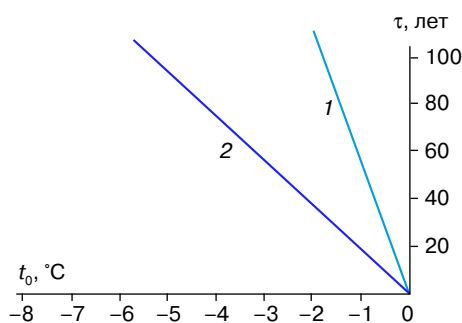
Закономерности деградации многолетнемерзлых пород (ММП) могут быть представлены в виде пространственно-временной изменчивости трех характеристик: время начала оттаивания ММП, повышение их среднегодовой температуры, понижение кровли ММП. Необходимые для таких оценок долгосрочные изменения температуры ММП требуют решения нестационарной задачи теплопроводности (задачи Стефана) с меняющимися во времени граничными условиями. Такая задача точного аналитического решения не имеет, ее реализация возможна только численными методами с использованием ЭВМ. Методика выполненных прогнозных расчетов изложена в [2].

Выбранные для исследования пункты (метеостанции с относительно длинными рядами наблюдений) примерно равномерно расположены на территории криолитозоны. В каждом пункте назначались несколько типов разреза пород. Так, для равнинных районов криолитозоны выбраны пески, суглинки и торф, подстилаемый песками или суглинками. В соответствии со строением разреза, составом и криогенным строением пород назначали необходимые для расчетов теплофизические характеристики. Для возможности сопоставления результатов расчетов свойства каждого типа пород приняты одинаковыми для всей криолитозоны. Для рыхлых пород коэффициент теплопроводности талого песка – 1,6, мерзлого – 1,8, талого суглинка – 1,2, мерзлого – 1,4, талого торфа – 0,6, мерзлого – 0,9 ккал/м.ч. · °С, объемная теплоемкость талого песка – 660, мерзлого – 490, талого суглинка – 720, мерзлого – 520, талого торфа – 660, мерзлого – 490 ккал/м<sup>3</sup> · °С, затраты тепла на фазовые переходы песка – 16 000, суглинка – 25 000, торфа – 50 000 ккал/м<sup>3</sup>. Для горных районов приняты теплофизические свойства, характерные для скальных пород выбранных реперных пунктов.

При прогнозном математическом моделировании были приняты следующие допущения. В течение расчетного периода (110 лет) повышение среднегодовой температуры воздуха происходит по линейному закону; теплофизические характеристики растительного и снежного покровов, а также теплофизические свойства верхнего слоя пород остаются неизменными; не учитывались возможная осадка оттаивающих ММП и развитие криогенных процессов. Расчетная область задавалась на 30–50 м глубже современного положения подошвы ММП. В процессе расчетов температурное поле фиксировалось по глубине расчетной области через 5–10 лет. Результаты моделирования, выполненного при таких допущениях, позволили выявить некоторые пространственно-временные закономерности процесса деградации криолитозоны.

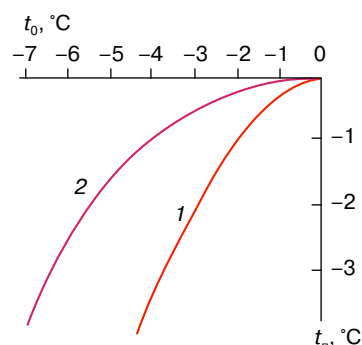
Период времени ( $\tau$ ) от начала потепления климата до момента, когда среднегодовая температура ММП повысится до 0°С (в дальнейшем начнется прогрессирующее оттаивание ММП), оказался

прямо пропорционален среднегодовой температуре ММП на момент начала потепления климата ( $t_0$ ) и обратно пропорционален тренду потепления ( $\Delta t$ ) и может быть рассчитан по уравнению  $\tau = A|t_0|/\Delta t$ , где  $A$  – коэффициент, который зависит от тренда повышения температуры воздуха и может быть получен из графика зависимости времени начала оттаивания ММП от их начальной среднегодовой температуры для каждого темпа потепления климата. На рис. 1 в качестве примера приведены графики для пунктов, различающихся строением разреза (торф, суглинок, песок), ландшафтными и климатическими условиями (использованы прогнозныe расчеты по пунктам Нум-То, Надым, Тазовский, Воркута, Амдерма), но имеющих один тренд потепления. Расчеты показали, что при  $\Delta t = 0,06^\circ\text{C}/\text{год}$   $A = 1,13$ , а при  $\Delta t = 0,045^\circ\text{C}/\text{год}$   $A = 2,48$ .



**Рис. 1.** Зависимость времени начала оттаивания ММП ( $\tau$ ) от их начальной среднегодовой температуры ( $t_0$ ) для разных трендов потепления климата: 1 –  $\Delta t = 0,045^\circ\text{C}/\text{год}$ , 2 –  $\Delta t = 0,06^\circ\text{C}/\text{год}$

Изменение среднегодовой температуры ММП в будущем существенно зависит от их начальной температуры (рис. 2). При относительно высоких начальных температурах ММП большая часть поступающего в грунт тепла идет на фазовые переходы при опускании кровли ММП, поэтому повышение температуры ММП относительно медленное. При



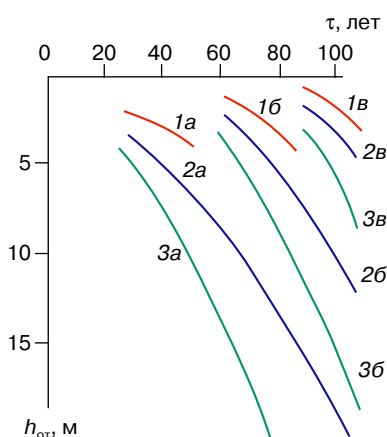
**Рис. 2.** Зависимость прогнозной среднегодовой температуры ММП ( $t_n$ ) от начальной среднегодовой температуры ( $t_0$ ) через 50 (1) и 110 (2) лет от начала потепления климата с трендом  $0,06^\circ\text{C}/\text{год}$

низких исходных температурах ММП интенсивность повышения их температур увеличивается. Моделирование также показало, что при тренде потепления  $0,06^\circ\text{C}/\text{год}$  скорость многолетнего оттаивания мерзлого торфа составит около  $6\text{ см}/\text{год}$ , суглинка –  $13$ , песка –  $20\text{ см}/\text{год}$  (рис. 3).

Выявленные закономерности позволяют установить количественные оценки интенсивности деградации ММП при их разной исходной среднегодовой температуре на любой момент времени от начала повышения температуры воздуха для разных пород. Результаты такой оценки на 50-й и 110-й год от начала потепления климата для некоторых типов грунтов представлены в табл. 1.

Через 50 лет от начала потепления в южной части криолитозоны, где современные температуры ММП не опускаются ниже  $-2^\circ\text{C}$ , начнется повсеместное разобшение на глубине сезонных и многолетнемерзлых толщ (формирование неслитых ММП). Слитые толщи мерзлых пород (ММП сливающегося типа) сохранятся на территориях с их современной среднегодовой температурой ниже  $-3^\circ\text{C}$ . Граница залегающих с поверхности ММП сместится на север приблизительно на  $350\text{--}400\text{ км}$ , то есть примерно до широты Полярного круга. Южнее этой границы возникнет зона со сложным чередованием слитых и неслитых ММП: при их исходной температуре  $-1 \div -2^\circ\text{C}$  кровля ММП начнет опускаться, при начальной температуре ниже  $-2^\circ\text{C}$  сохранятся слитые ММП.

Состояние криолитозоны Западной Сибири через 110 лет от начала потепления климата отражено на рис. 4. При составлении карты использованы границы и градации среднегодовых температур ММП, показанные на геокриологической карте России масштаба  $1 : 2\,500\,000$ . На карте выделены



**Рис. 3.** Зависимость глубины оттаивания ММП ( $h_{от}$ ) от времени с начала потепления климата ( $\tau$ ) с трендом  $0,06^\circ\text{C}/\text{год}$  для торфа (1), суглинка (2) и песка (3) при разной начальной среднегодовой температуре ММП: а –  $t_0 = -1^\circ\text{C}$ , б –  $t_0 = -3^\circ\text{C}$ , в –  $t_0 = -5^\circ\text{C}$

**Таблица 1**

Температура ММП к началу потепления, $^\circ\text{C}$	Время начала оттаивания ММП, лет	Прогнозные характеристики криолитозоны через 50 лет (в числителе) и 110 лет (в знаменателе) от начала потепления			
		температура ММП, $^\circ\text{C}$	глубина оттаивания ММП, м		
			торфа	суглинка	песка
-7	>110	$\frac{<-5}{-2,5}$	—	—	—
-5	95	$\frac{-3}{-1}$	—	—	—
-3	95	$\frac{-1}{-0,2}$	$\frac{—}{2,5}$	$\frac{—}{8}$	$\frac{—}{13}$
-2	40	$\frac{-0,5}{-0,2}$	$\frac{1}{>3}$	$\frac{2}{10}$	$\frac{4}{16}$
-1	20	$\frac{-0,2}{>3}$	$\frac{2}{>3}$	$\frac{5}{13}$	$\frac{8}{20}$
-0,5	10	$\frac{-0}{>0}$	$\frac{>3}{>3}$	$\frac{6}{14}$	$\frac{10}{22}$

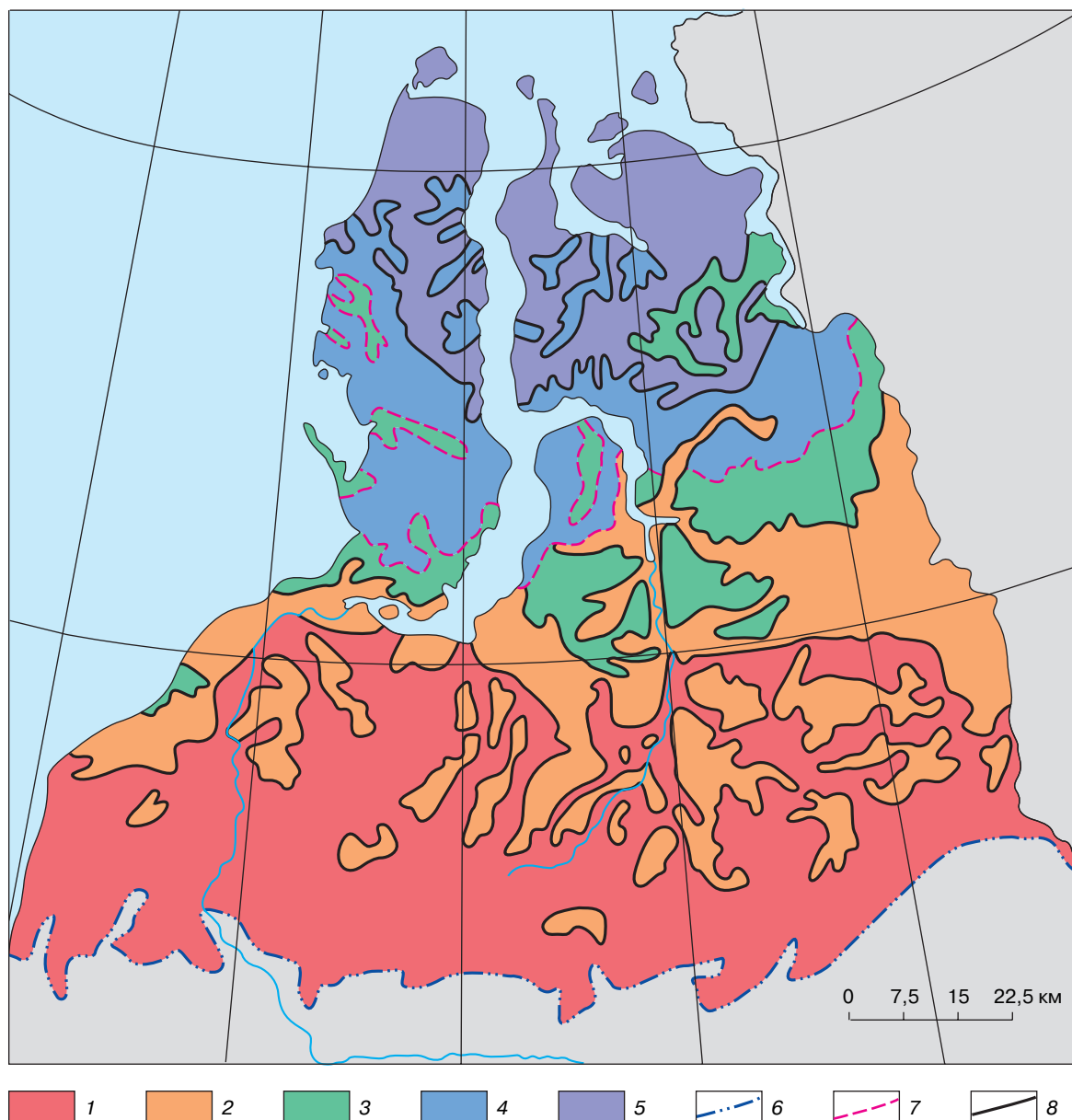
четыре области с различными прогнозируемыми геокриологическими условиями.

1. Область, где ныне существующие ММП за расчетный период полностью протают. Оттаивание ММП здесь начнется через  $5\text{--}10$  лет от начала потепления. Среднегодовые температуры пород в этой области будут по всему разрезу положительные. Северная граница области будет приблизительно соответствовать современной границе распространения высокотемпературных (не ниже  $-0,5^\circ\text{C}$ ) ММП.

2. Область, где практически повсеместно ММП оттают с поверхности. В зависимости от интенсивности повышения температуры воздуха оттаивание ММП начнется через  $10\text{--}50$  лет от начала потепления воздуха. В разрезе выделяется два горизонта пород: талые со среднегодовой температурой от  $0$  до  $2^\circ\text{C}$  и подстилающие их ММП, температура которых меняется по глубине от  $0$  до  $-0,5^\circ\text{C}$ . Эта область соответствует современному распространению ММП со среднегодовой температурой от  $-0,5$  до  $-5^\circ\text{C}$ .

3. Область, где будут преобладать ММП со среднегодовой температурой до  $-2,5^\circ\text{C}$  и встречаться участки, где, как и во второй области, произойдет оттаивание ММП с поверхности. Оттаивание ММП на таких участках начнется не ранее чем через  $80$  лет от начала потепления. Южная граница этой области является прогнозной границей распространения ММП на  $110$ -й год от начала потепления. Граница с поверхности ММП сместится за этот период на  $700\text{--}800\text{ км}$  к северу.

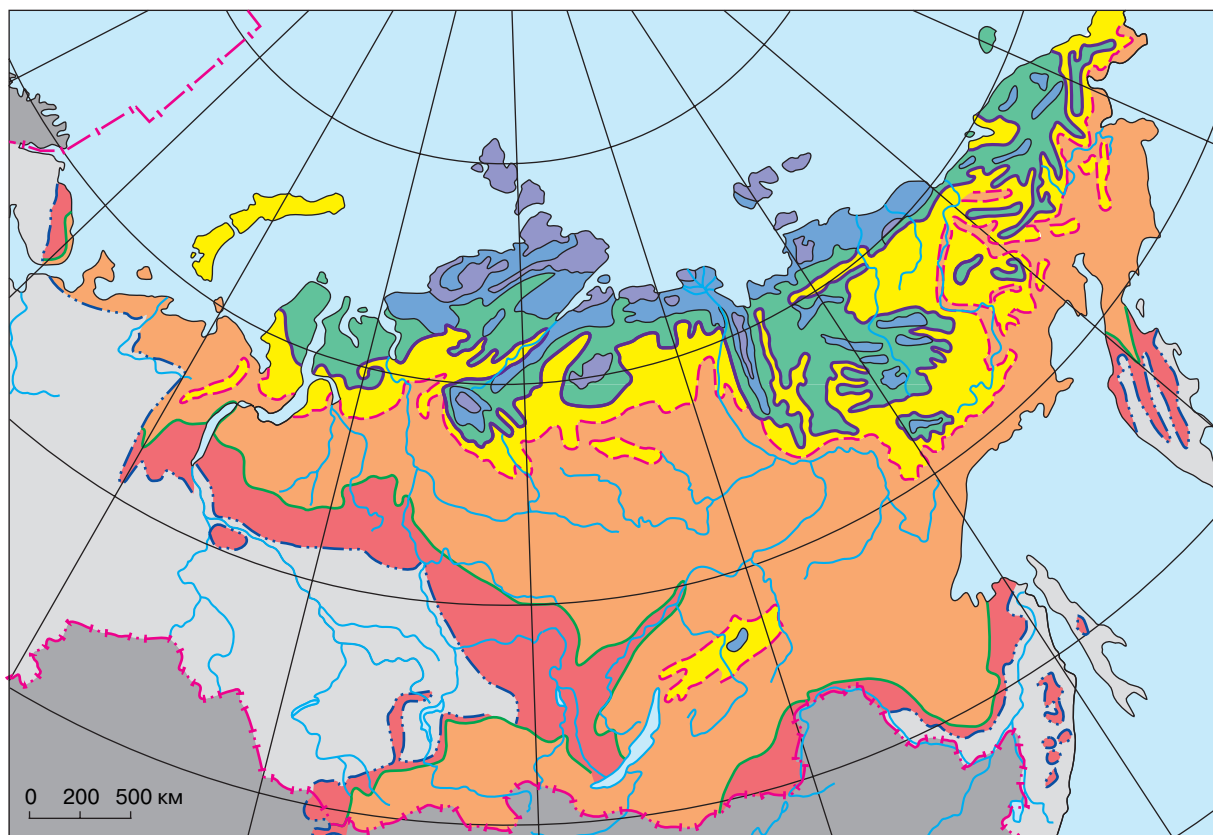
4. Область сплошного распространения ММП. Она соответствует современному распространению



**Рис. 4.** Прогнозная геокриологическая карта севера Западной Сибири на 110-й год от начала возможного глобального потепления климата (по сценарию ИГКЭ): 1 – территория протаявших ММП; 2 – территория распространения ММП несливающегося типа с глубиной залегания кровли ( $h$ ) в торфах более 3,5 м, в суглинках 8–15 м, в песках 15–25 м и где среднегодовая температура пород ( $t_0$ ) повысится от  $0 \pm -3$  до  $0 \pm -0,5^\circ\text{C}$ ; 3 – территории распространения ММП несливающегося типа с  $h$  в торфах 1,5–3,5 м, в суглинках 3,5–8 м, в песках 6–13 м и где  $t_0$  повысится от  $-3 \pm -5$  до  $-1 \pm -2^\circ\text{C}$ ; 4 – территории распространения ММП,  $t_0$  которых повысится от  $-5 \pm -7$  до  $-1 \pm -2^\circ\text{C}$  с участками несливающихся ММП, где  $h$  в торфах до 1,5 м, в суглинках до 3,5 м, в песках до 6 м; 5 – территории сплошного распространения ММП,  $t_0$  которых повысится от  $-7 \pm -9$  до  $-2 \pm -4^\circ\text{C}$ ; границы: 6 – современная южная граница распространения ММП, 7 – прогнозная южная граница распространения ММП, 8 – граница территорий с разными прогнозными геокриологическими условиями

ММП со среднегодовой температурой ниже  $-7^\circ\text{C}$ . Среднегодовая температура ММП этой области, за исключением таликовых зон под крупными реками и озерами, останется отрицательной, но на  $4-6^\circ\text{C}$  выше, чем в современных условиях.

Во всех областях талые, протаивающие и мерзлые породы будут характеризоваться нестационарным температурным режимом. Их температура по разрезу, глубины сезонного промерзания, сезонного и многолетнего оттаивания будет меняться во



**Рис. 5.** Прогнозная геокриологическая карта России на 110-й год от начала возможного глобального потепления климата (по сценарию ИГКЭ): 1 – область протаявших ММП; 2 – область распространения ММП несливающегося типа с глубиной залегания кровли от 5 до 20 м (реликтовые ММП, залегающие на глубине 50 м и более, на карте не показаны) со среднегодовой температурой пород ( $t_0$ ) 0–3°C; 3 – область островного (50–90%) распространения ММП,  $t_0 = 0,5–2^\circ\text{C}$ ; 4–6 – область сплошного распространения ММП: 4 –  $t_0 = -1 \div -5^\circ\text{C}$ , 5 –  $t_0 = -5 \div -6^\circ\text{C}$ , 6 –  $t_0 = -5 \div -8^\circ\text{C}$ ; границы: 7 – современная южная граница распространения ММП, 8 – ММП несливающегося типа, 9 – островного распространения ММП, 10 – сплошного распространения ММП

времени на протяжении всего прогнозного периода. Итогом проведенных исследований явилась “Прогнозная геокриологическая карта России на 110-й год...” масштаба 1 : 25 000 000 (рис. 5). Масштаб карты позволяет отразить закономерности изменения геокриологической обстановки в генерализованном виде.

Выявленные пространственно-временные закономерности деградации криолитозоны могут быть использованы для более обоснованного решения прогнозных инженерно-геокриологических и геоэкологических задач, прогноза динамики криогенных процессов и явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 406 с.

2. Ершов Э.Д., Максимова Л.Н. и др. Реакция мерзлоты на глобальные изменения климата // Геоэкология. 1994. № 5.

3. Парниковый эффект, изменения климата и экосистемы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989.

\* \* \*

Эдуард Дмитриевич Ершов, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ, заслуженный деятель науки РСФСР, лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники и премии им. М.В. Ломоносова первой степени. Автор более 300 научных статей, 15 монографий и восьми учебников и учебных пособий в области теплофизики, физикохимии и петрографии мерзлых пород, региональной, динамической, литогенетической и исторической геокриологии.