

Разработка подхода к дорожно-климатическому районированию в зоне вечной мерзлоты в первой дорожно-климатической зоне

Быстров Н.В. (РУТ МИИТ/ «Р.О.С.АСФАЛЬТ»)

Вознесенский Е.А., Сергеев Д.О. (ИГЭ РАН)

Железняк М.Н. (ИМЗ СО РАН)

Ефименко В.Н., Ефименко С.В. (ТГАСУ)

21 августа 2024 г., Благовещенск

Дорожно-климатическое районирование развивается в нашей стране **более 70 лет**

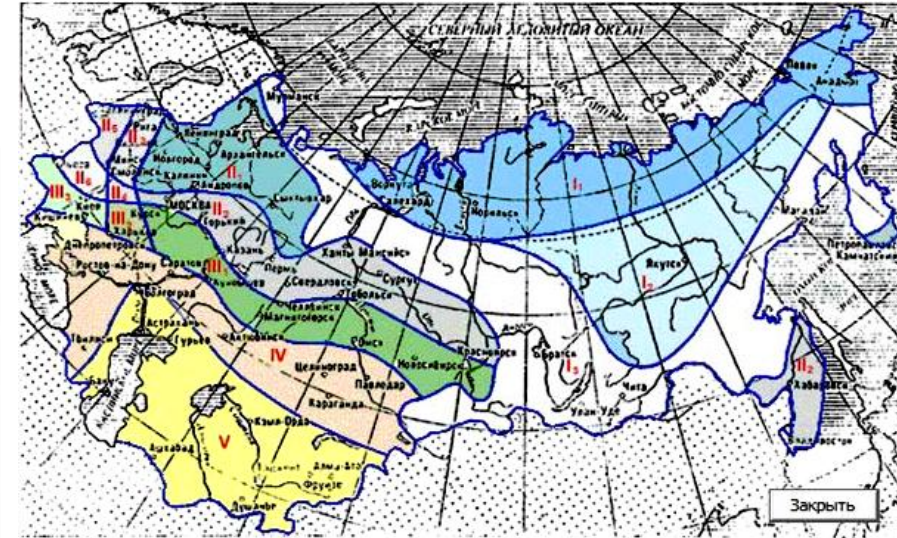
В результате многолетних исследований с 1962-63 гг. по 1975-77 гг. Омским филиалом Союздорнии были организованы наблюдения за прочностью и устойчивостью дорожных конструкций на автомобильных дорогах в районах вечной мерзлоты (в р-не г. Норильска, на автодорогах Ленск – Мирный, Мирный – Чернышевск, Вилюйская ГЭС – Айхел - Трубка Удачная, Якутск - Покровск, Якутск - Намцы, Романовка - Богдарин и на др.).

На основе этих 10 - 13 летних наблюдений на постах и опытных участках указанных дорог, а также результатов многолетних обследований дорог было уточнено дорожно-климатическое районирование территории СССР, занятой вечной мерзлотой, впервые разработанное и отражённое в нормах проектирования НИТУ 128-55. В работах Омского филиала Союздорнии были разработаны принципы проектирования и строительства дорог на вечномёрзлых грунтах, изучены особенности водно-мерзлотного режима земляного полотна, разработаны особенности расчета дорожных одежд на прочность и конструкции земляного полотна дорог с учётом принципов проектирования, а также технология строительства земляного полотна и дорожных одежд в условиях наличия вечномёрзлых грунтов и с учётом резко континентального климата - жаркого лета и низких зимних отрицательных температур воздуха.

Характеристика и границы подзон зоны вечной мерзлоты

Подзона вечной мерзлоты	Характеристика природных мерзлотно-грунтовых условий	Примерные границы районов
1	2	3
I ₁ - северная подзона низкотемпературных вечномёрзлых грунтов (НТВМГ) сплошного распространения	Сплошное распространение вечномёрзлых грунтов мощностью от 200 до 900 м и более. Среднегодовая температура вечномёрзлых грунтов от -5 до -10°C и ниже.	Включает зону тундры и лесотундры с пятнистым микрорельефом
	Глубина сезонного оттаивания от 0,2 до 2 м (преимущественно менее 1 м). Высокое содержание в вечномёрзлых грунтах льдов различных типов и их неглубокое залегание. Грунты глинистые, пылеватые, иловатые, тундровые и болотные со среднегодовой суммарной влажностью более предела текучести. Рельеф - равнины и низменности. Интенсивное развитие криогенных процессов	Расположен севернее линии Нарьян-Мар - Салехард - Курейка - Трубка Удачная - Верхоянск - Дружно - Горный мыс - Марково
I ₂ - центральная подзона низкотемпературных вечномёрзлых грунтов (НТВМГ) сплошного распространения	Сплошное распространение вечномёрзлых грунтов мощностью от 50 до 400 м Среднегодовая температура вечномёрзлых грунтов от -1 до -5 °C Глубина сезонного оттаивания от 0,8 до 3 м. Грунты скальные, щебенистые, гравийно-галечниковые и глинистые со среднегодовой суммарной относительной влажностью от 0,7 до 1,0 относительно предела текучести.	Включает таежную зону, зону смешанных лесов. Расположен восточнее линии устье реки Нижняя Тунгуска - Ербогачен - Ленск, Бодайбо - Богдарин; севернее линии Могоча - Сковородино - Зей - Охотск -

Давыдов В.А., Бондарева Э.Д. ИЗЫСКАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ Учебное пособие. Омск ОмПИ 1989. 82 с.



Разнообразие природно-климатических условий России учитывают с помощью дорожно-климатического районирования (ДКР), получившего в разные периоды отражение в нормативных документах (НИТУ 128-55, СНиП II-Д.5-62, ВСН 84-62, ВСН 84-75, ВСН 46-83, СНиП 2.05.02-85, ВСН 84-89, ОДН 218.046-01 и др. Многолетний опыт применения существующего дорожно-климатического районирования выявил, что оно не удовлетворяет в полной мере практике изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации линейных объектов транспортной инфраструктуры, особенно в районах с наличием многолетнемерзлых грунтов и требует дальнейшего уточнения и детализации [Справочная энциклопедия дорожника, V том, 2007].

Развивается сеть дорог с твёрдым покрытием в разнообразных мерзлотных условиях



Положение трасс федеральных автодорог «Амур», «Лена», «Колыма» и «Вилюй» на Геокриологической карте СССР масштаба 1 : 2 500 000

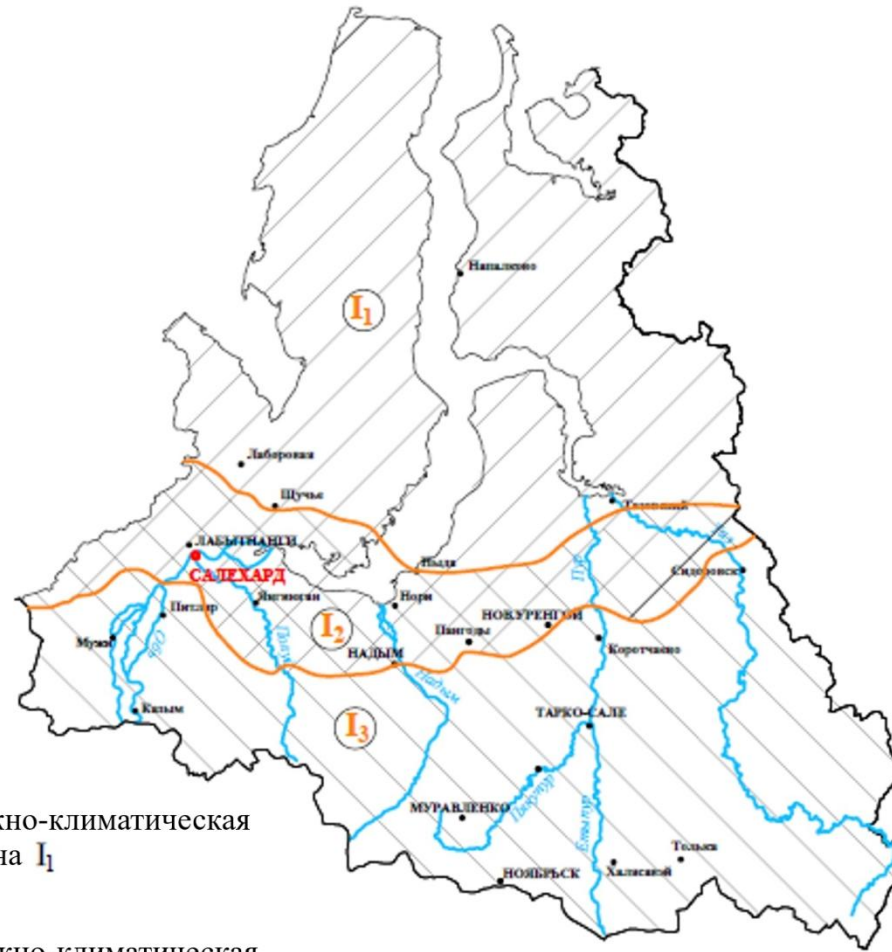
Развитие традиционных подходов к дорожно-климатическому районированию

Рекомендуется использование иерархической системы: «зона – подзона – дорожный район».

«Дорожный район» соответствует территории, характеризующейся условно однородными микроклиматическими, геолого-мерзлотными, гидрогеологическими, геоморфологическими и гидрологическими условиями.

«Подзона» соответствует физико-географическому понятию фации, объединяющей районы по выбранному критерию.

«Зона» объединяет «подзоны» с общим характером рельефа и растительности.



Условные обозначения



Дорожно-климатическая подзона I₁



Дорожно-климатическая подзона I₂



Дорожно-климатическая подзона I₃



Дорожно-климатическое районирование территории Кемеровской области: пунктирные линии – по СП 34.13330.2012: I, II, III – дорожно-климатические зоны; 1–2 – подзоны сплошные – по В.Н. Ефименко; I, II, III – дорожно-климатические зоны; Р, Х, Г – подзоны по типу рельефа (равнинный, холмистый, гористый); 1–4 – номера дорожных районов

Достижения климатологов



Климатическое районирование позволяет учесть различные климатические характеристики в их взаимодействии. Заметим, что немаловажным является учёт рельефа территории.

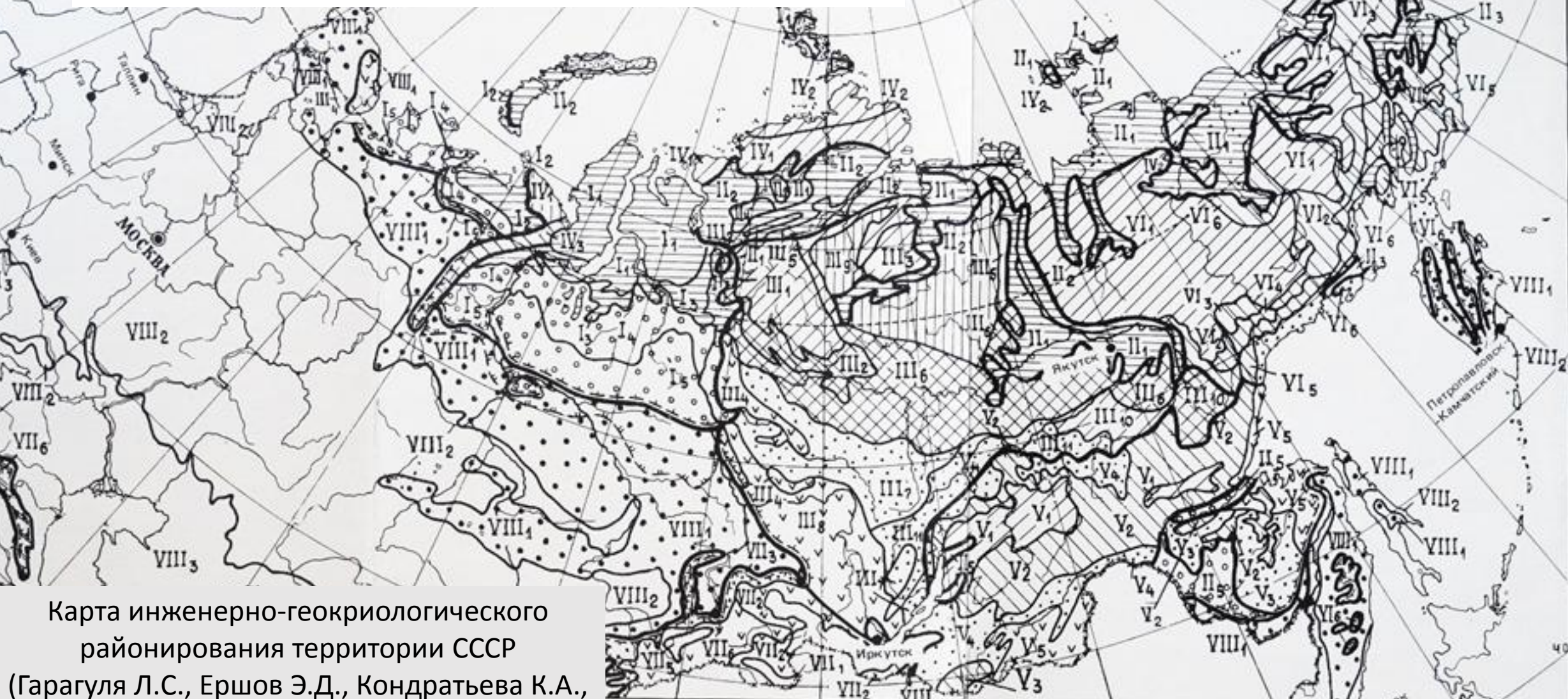
Рис. 11. Климатические пояса и области СССР. По Б. П. Алисову.

1, 2 — границы и индекс климатических поясов (1) и областей (2); 3 — горные районы. Климатический пояс: I — арктический, II — субарктический, III — умеренный, IV — субтропический; области: 1 — внутриарктическая, 2 — атлантическая, 3 — сибирская, 4 — тихоокеанская, 5 — атлантическая, 6 — сибирская, 7 — тихоокеанская, 8 — атлантико-арктическая, 9 — атлантико-континентальная Европейская, 10 — континентальная Западно-Сибирская, 11 — континентальная Восточно-Сибирская, 12 — муссонная Дальневосточная, 13 — тихоокеанская, 14 — атлантико-континентальная Европейская, 15 — континентальная Западно-Сибирская и Североказахстанская, 16 — континентальная Восточно-Европейская, 17 — континентальная Центральноказахстанская, 18 — континентальная Северотуранская, 19 — горная Большого Кавказа, 20 — горная Алтай и Саян, 21 — горная Тянь-Шаня, 22 — Закавказская, 23 — континентальная Южнотуранская, 24 — горная Памиро-Алая

Достижения климатологов

Индекс поясов и областей (см. рис. 11)	Характеристика рельефа и геоботанических условий	Основные климатические характеристики			
		суммарная солнечная радиация эффективное излучение земной поверхности Вт/м ²	средняя годовая температура воздуха, °С амплитуда годовых колебаний температуры воздуха, °С	сумма осадков за год, мм высота снега, см	средняя годовая разность осадков и испаряемости, мм индекс сухости
I	1 Денудационные равнины, плато и плоскогорья с отм. до 250 м. Ледяная и горная пустыни, горные тундры	$\frac{90 \div 98}{25 \div 28}$	$\frac{-7 \div -15}{16-30}$	$\frac{160 \div 200}{40 \div 60}$	$\frac{-}{<0,45}$
	2 Аккумулятивные равнины с отм. до 250 м. Тундры	$\frac{83 \div 108}{25 \div 36}$	$\frac{-1 \div -15}{10 \div 42}$	$\frac{200 \div 450}{40 \div 60}$	$\frac{-}{<0,45}$
	3 Аккумулятивные, денудационные равнины, плато, плоскогорья с отм. до 250 м. Тундры	$\frac{97 \div 113}{28 \div 42}$	$\frac{12 \div -15}{30 \div 47}$	$\frac{170 \div 250}{48 \div 60}$	$\frac{-}{<0,45}$
	4 П	$\frac{90 \div 108}{25 \div 36}$	$\frac{-8 \div -12}{16-30}$	$\frac{300 \div 400}{40 \div 60}$	$\frac{-}{<0,45}$

*Достижения мерзлотоведов:
районирование по принципу строительства*



Карта инженерно-геокриологического районирования территории СССР (Гарагуля Л.С., Ершов Э.Д., Кондратьева К.А., Хрусталёв Л.Н., 1988)



Достижения мерзлотоведов

Генетический тип макрорельефа (регионы)	Инженерно-геологические формации дочетвертичных пород и генетические комплексы четвертичных отложений (провинции)	Геокриологические области	1 геокриологическая	
			Тип промерзания: эпигентический (Э), сингенетический (С)	Среднегодовая температура, С
I. Полигенетические аккумулятивные равнины Северо-Востока Русской платформы и северной части Западно-Сибирской плиты	Морские, ледниково-морские, аллювиально-озерные: глины, пылеватые и оторфованные супеси и суглинки, торф	I ₁	Э, С	Ниже -5
		I ₂	Э	от -1 до -3
	Ледниково-морские, флювиогляциальные, озерно-ледниковые, озерно-аллювиальные: суглинки, пылеватые супеси и пески, галечники, оторфованные супеси и суглинки, торф	I ₃	Э	Выше -3
		I ₄	Э	Выше -2
		I ₅	Э	Выше -1
II. Полигенетические аккумулятивные равнины севера Сибирской платформы, Енисей-Хатангского прогиба, Яно-Колымской и Центрально-якутской низменности, Северо-Востока Русской платформы и межгорных впадин юга Дальнего Востока	Полигенетический «ледовый» комплекс: пылеватые супеси и пески, торф	II ₁	С	от -3 до -5 и ниже
		II ₂	Э, С	Ниже -5
	Ледниковые, озерно-ледниковые, флювиогляциальные: валунные суглинки, глины, супеси, пески, галечники	II ₃	Э	От -0,5 до -5
		II ₄	Э, С	Ниже -5

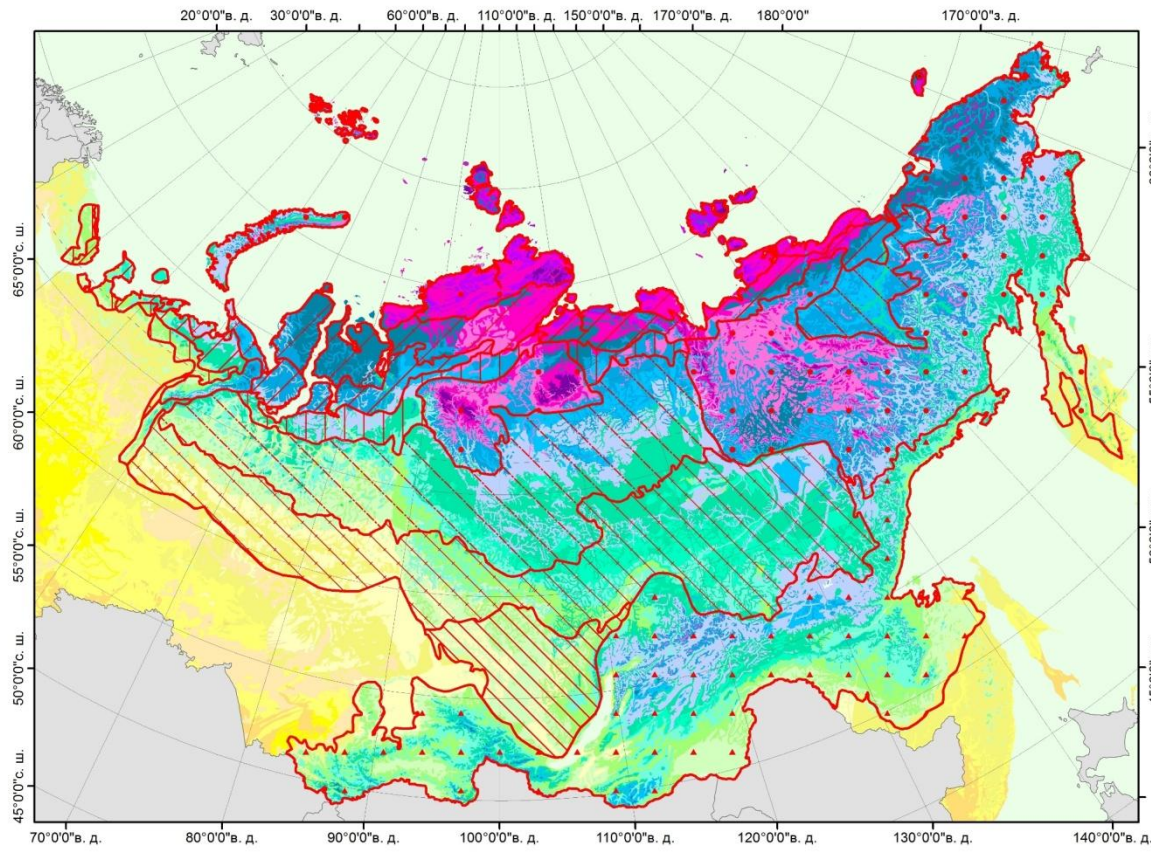
Пояснительная записка к Карте инженерно-геокриологического районирования территории СССР (Гарагуля Л.С., Ершов Э.Д., Кондратьева К.А., Хрусталёв Л.Н., 1988)

характеристика				
Распространение мерзлых пород	Мощность мерзлых пород, м	Льистость (объемная) 20-метровой толщи мерзлых пород. Рыхлых, доля ед. Скальных	Сейсмичность в баллах по шкале MSK	Принцип использования мерзлых грунтов в основании сооружений
Сплошное	>300	0,4÷0,6	<5	I
Прерывистое и сплошное	100÷300	0,2÷0,6	<5	I, возможен II
То же	100÷300	0,2÷0,4	<5	I
Редко- и массивно-островное	До 50	0,2÷0,4	<5	II, возможен I
То же	0÷25	0,2÷0,4	<5	II
Сплошное	>300	0,6÷0,8	5, 6; локально 7	I
То же	>300	0,3÷0,6	5; локально 6	I
От редкоостровного до сплошного	50÷300	0,2÷0,5	5, 6; локально 7	I, возможен II
Сплошное	>300	0,1÷0,2, реже до 0,4	<5	I, возможен II
Редко- и массивно-островные	0÷50	0,1÷0,3	5; локально 6, 7, 9	I, возможен II
Сплошное	>300	$\frac{0,3÷0,6}{0,03÷0,2}$	<5	I, возможен II

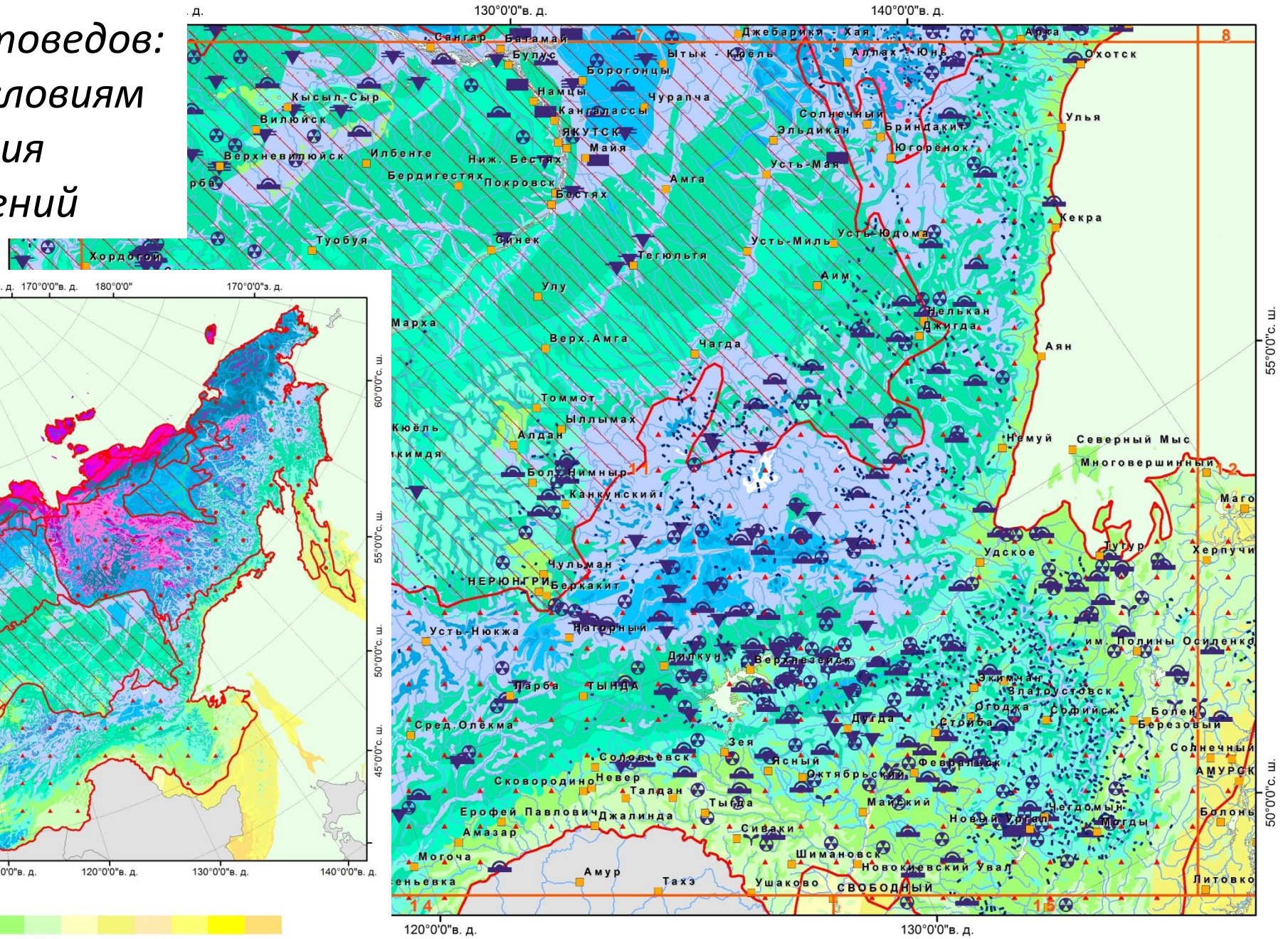
III. денудационные плато и плоскогорья Сибирской и Русской платформ

Скальные мерзлотозивных и эффузивно-терригенных формаций

Достижения мерзлотоведов: районирование по условиям распространения мерзлотных явлений



Средняя температура пород, °С (2020 год)



Достижения мерзтоведов: районирование по условиям распространения мерзлотных явлений

Карта-схема мерзлотно-ландшафтного районирования криолитозоны на территории деятельности дочерних компаний ПАО «Газпром»

Условные обозначения

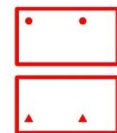
Средняя температура многолетнемерзлых пород, 2020 год, °C



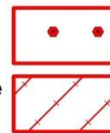
Участки со средней температурой +0,75°C характеризуют участки редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород с температурой от +2 до -0,5°C

Масштаб 1:5 000 000

Ландшафты



Горнотундровые
Горнотаежные



Арктические (полярные) пустынные
Северотундровые и типичнотундровые



Южнотундровые
Лесотундровые



Северотаежные
Среднетаежные



Южнотаежные

Криогенные явления

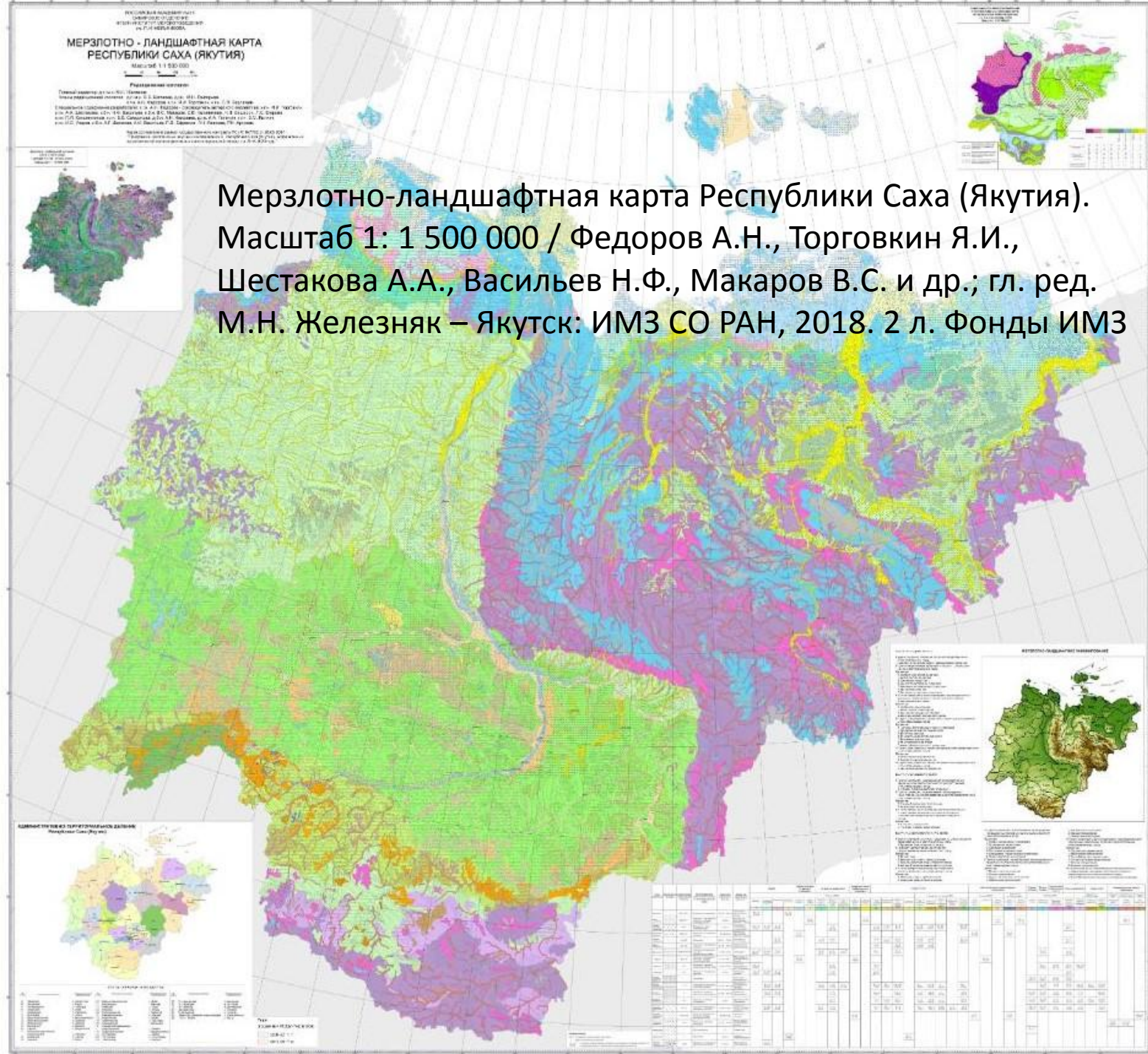
- Бугристо-западинный (остаточно-полигональный) рельеф, в пределах генетических типов пород
- Бугры пучения (преимущественно многолетние), в пределах генетических типов пород
- Выпуклобугристые торфяники, в пределах генетических типов пород
- Грунтовые жилы, в пределах генетических типов пород
- Ледники, в пределах генетических типов пород
- Наледи подземных вод, в местах локального распространения
- Пластовые залежи подземного льда, в местах локального распространения

- Пластовые залежи подземного льда, в пределах генетических типов пород
- Плоскобугристые торфяники, в пределах генетических типов пород
- Повторно-жильные льды (ПЖЛ) мощностью до 10 м, в пределах генетических типов пород
- Повторно-жильные льды (ПЖЛ) мощностью 10-20 м, в пределах генетических типов пород
- Повторно-жильные льды (ПЖЛ) мощностью 20-30 м и более, в пределах генетических типов пород
- Термокарстовые озера и котловины, в пределах генетических типов пород
- Туфуры (сезонные бугры пучения вне криолитозоны), в местах локального распространения
- Наледи подземных вод, в местах локального распространения

Достижения мерзлотоведов: региональные карты вечной мерзлоты



Мерзлотная карта ЯНАО
(Горшков Е., Антипов А., 2023)



Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия).
Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И.,
Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред.
М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л. Фонды ИМЗ

Достижения мерзловедов: региональные карты вечной мерзлоты

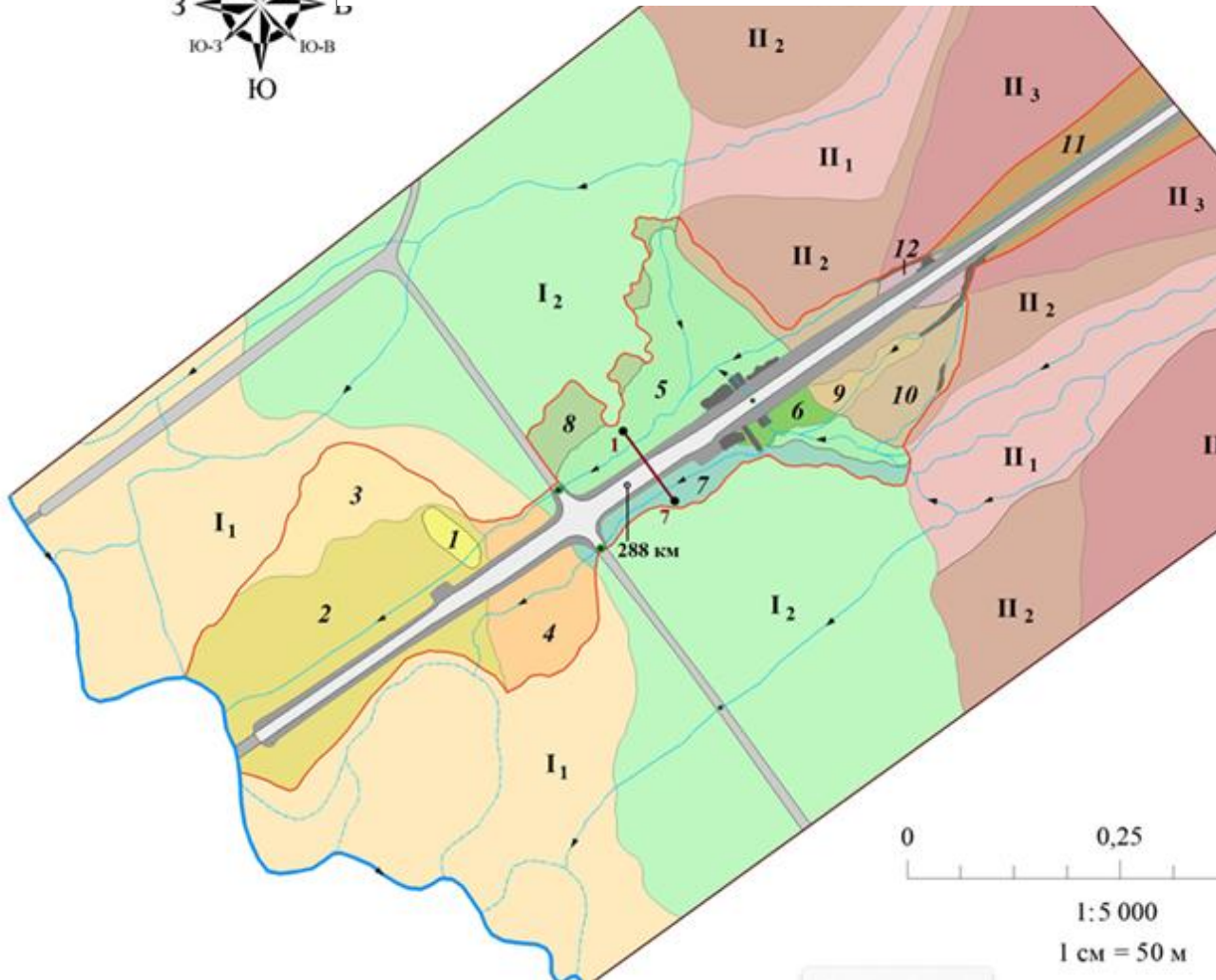
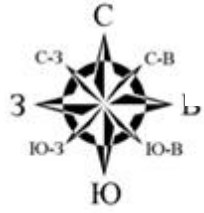
Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия).
Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И.,
Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. и др.; гл. ред.
М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л. Фонды ИМЗ



Типы местности	Обозначение на карте	Стратиграфо-генетический комплекс	Преобладающие криогенные текстуры и залегообразующие льды	Объемная льдистость, доли ед.	Основные криогенные процессы	Тундры на сплошных ММП				Интразональные тундровые ландшафты	
						Арктические травянистые	Типичные кустарничково-лишайниковые и моховые	Кустарниковые	Разреженная растительность	Тундроболота полигонально-валиковые	Комплекс тундровой долинной растительности
						1**	2	3	4	5	6
Маршевый		mH, mH1-2	Массивные, линзовидные	до 0,2 ... 0,2-0,4	Морозобойное растрескивание, пучение	-11...-13 0,2-0,4			-11...-13 0,4-0,6		
Низкотеррасовый		aH, aIII-H	Массивные, линзовидные, слоистые; системы маломощных ПЖЛ*	0,2-0,4	Морозобойное растрескивание, термокарст, пучение						-6...-9 0,4-0,8
Средневысотный террасовый		aII-III	Массивные; редко пластовые льды	0,2-0,4	Морозобойное растрескивание, термосуффозия	-10...-12 0,2-0,4	-8...-10 0,3-0,5	-6...-8 0,5-0,8			
Межгрядово-низинный		aII-III, bH	Массивные, линзовидные, слоистые	0,2-0,4 (0,6)	Морозобойное растрескивание, термокарст, пучение				-6...-8 0,4-0,8		
Высокотеррасовый		aI, aI-II	Массивные	до 0,2 ... 0,2-0,4	Морозобойное растрескивание			-6...-8 0,5-0,8			
Древнетеррасовый		IpH, LH	Массивные, корковые, линзовидные	до 0,2 ... 0,2-0,4	Морозобойное растрескивание						
Межаласный		LedIII, IaII-III, aIII	Слоистые, линзовидные, сетчатые; системы мощных ПЖЛ	0,4-0,6 (0,8*)	Термокарст	-10...-12*** 0,2-0,4	-8...-10 0,3-0,5	-7...-8 0,4-0,6			
Аласный		IpH, LH	Слоистые, линзовидные, сетчатые; системы маломощных ПЖЛ*	0,2-0,4 (0,6*)	Морозобойное растрескивание, пучение				-6...-8 0,4-0,8		
Моренный		gIII	Массивные, корковые, базальные; системы ПЖЛ	0,2-0,4 (0,6)	Термокарст, морозобойное растрескивание	-10...-12 0,2-0,4					
Зандровый		fIII	Массивные, линзовидные, корковые	0,2-0,4	Термокарст, пучение	-10...-12 0,2-0,4	-8...-10 0,3-0,5	-7...-8 0,4-0,6			



Достижения мерзлотоведов: локальные карты вечной мерзлоты



Условные обозначения к ландшафтно-геокриологической карте:

Морфологические единицы ландшафта расположены в пределах *Оловской межгорной впадины*, выполненной позднеюрскими (J_{3uk2}) и раннемеловыми (K_{1dr}) осадочными (песчанники, алевролиты, алевропесчанники и т.д.) и вулканогенно-осадочными образованиями (туфоалевролиты, туфоконгломерато-брекчии и т.д.), мощностью 158-310 м.

I. Геосистемы аккумулятивной речной долины.

I₁. Пойма (533-538 м), ровная и слабоволнистая, сложенная голоценовыми (Q_n) аллювиальными галечными, гравийно-галечными, валунно-галечными, алевролитистыми песками, глинистыми алевролитами, дресьянистыми супесями, глинами, мощностью от 1 до 15 м. Многолетнемерзлые породы прерывистые с наличием таликовых зон под руслами. Криотекстура массивная, корковая, льдистость 0.1-0.3 доли ед. Глубина сезонно-талого слоя 1-3 м. Растительность луговая, вдоль русел кустарниковая. Почвы дерново-глеевые мерзлотные и аллювиальные. Современные экзогенные процессы – подтопление, заболачивание, русловая и пойменная аккумуляция, наледеобразование (наледи речных вод).

Производные геосистемы (ПТС):

1. Ложбинные геосистемы (усилилось подтопление, активизировался термокарст по погребенным льдам, изменились микроформы рельефа, избыточное увлажнение привело к заболачиванию и смене растительного покрова).
2. Плоскозападинные геосистемы (усилилась русловая и пойменная аккумуляция, изменились микроформы рельефа, высокое увлажнение привело к заболачиванию и смене растительного покрова).
3. Слабоволнистые геосистемы (усилилось подтопление, изменились микроформы рельефа, повышенное увлажнение привело к частичной смене растительного покрова).
4. Плоскобугристые слабовогнутые геосистемы (усилилось поверхностное увлажнение, активизировалась линейная эрозия, изменились микроформы рельефа, дополнительное увлажнение привело появлению эрозионных борозд и частичной смене растительного покрова).

I₂. Надпойменная терраса (538-550 м), плоскобугристая и полигональная, сложенная верхнеплейстоценовыми ($Q_{ш}$) аллювиальными гравийно-галечниковыми, алевролитовыми и алевролитистыми песками, гравийными и гравийнистыми галечниками, супесями и суглинками с гравием и галькой, мощностью от 1 до 7 м. Многолетнемерзлые породы сплошные. Криотекстура массивная, порфириовидная, льдистость 0.2-0.4 доли ед. Глубина сезонно-талого слоя 2.5-4 м с перелетками до 7 м. Растительность разнотравно-злаковая. Почвы дерново-луговые мерзлотные. Современные экзогенные процессы – линейная эрозия, заболачивание, термокарст по повторно-жильным льдам, криогенное пучение, морозобойное растрескивание, склоновая аккумуляция.

Производные геосистемы (ПТС):

Основные принципы районирования

- ✓ соответствие классификационных признаков цели составления карты (требует конкретизации перечня практических задач, которые будут решаться с использованием схем дорожного районирования);
- ✓ полнота деления территории по выделенным таксонам;
- ✓ сопоставимость признаков районирования по рангу и их соответствие масштабу карты;
- ✓ использование разных признаков районирования и решение разных управленческих задач на каждой иерархической ступени районирования (национальной, региональной, локальной);
- ✓ обоснование положения границ полными, актуальными, сопоставимыми и достоверными данными.

Дорожно-климатическое районирование = районированию условий взаимодействия дорожных конструкций и окружающего ландшафта (включая геологическое строение, рельеф и климат)

Комплекс опасных криогенных процессов в связи с многолетнемерзлыми породами на дороге Голмуд-Лхаса в зависимости от высоты насыпи и экспозиции в течение первых 30 лет эксплуатации.

[Харрис и др. 2020]



Дорожно-климатическое районирование = районированию условий взаимодействия дорожных конструкций и окружающего ландшафта (включая геологическое строение, рельеф и климат)

Задачи учёта региональных условий при проектировании

Задачи учёта региональных условий при строительстве

Задачи учёта региональных условий при эксплуатации

Современное
дорожное
районирование

Климатические условия (с учётом прогноза климатических изменений)

Гидрологические условия (с учётом типов местности по режиму и степени увлажнения)

Инженерно-геологические условия (с учётом прогноза динамики опасных процессов)

Уровни районирования

Национальный уровень	Детализируется дорожно-климатическое районирование с учётом результатов мелкомасштабного геокриологического прогноза изменения фоновых геокриологических условий, вызванных климатическими переменами. Определяется перечень неблагоприятных процессов.
Уровень автодороги	Определяется однородность условий функционирования дороги и проектные решения по строительству или дополнительной инженерной защите. Обосновываются приоритеты расположения автоматизированных постов геотехнического мониторинга.
Уровень участка с массовыми деформациями	На картах отображаются временная изменчивости местоположения и других характеристик очагов проявления криогенных процессов.
Уровень автоматизированного поста мониторинга	На картах отображаются основные элементы природно-технической системы, положение точек (скважин) для организации наблюдений и область прогнозного моделирования. В результате уточняется диагноз ведущего процесса, разрушающего дорогу и выбирается способ инженерной защиты.

Предполагаемый вариант подхода к дорожно-климатическому районированию

Подход основан на формировании иерархической системы показателей геолого-географического комплекса, по которым формируют карты, необходимые при решении инженерных задач проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Информация для дорожного районирования черпается из трёх основных источников:

- справочная литература (включая существующие карты);
- результаты наблюдений (в т.ч. мониторинговых) за процессами водно-теплого режима дорожных конструкций;
- результаты теоретического моделирования.

Использование источников информации обосновывается для трёх уровней масштаба: национального, регионального и локального.



Отдельная благодарность Федеральному дорожному агентству за внимание к разрабатываемой тематике