

УДК 911.6:624.139(571.56)

**ПОДХОДЫ К ИНЖЕНЕРНО-ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОМУ
РАЙОНИРОВАНИЮ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)****Шестакова А.А., Спектор В.Б., Торговкин Я.И.***ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова» СО РАН, Якутск,
e-mail: aashest@mail.ru, vbspector@mpi.ysn.ru, torgovkin@mpi.ysn.ru*

В данной статье рассмотрено инженерно-геокриологическое районирование территории Республики Саха (Якутия), которое осуществлено с помощью анализа основных факторов формирования инженерно-геокриологических условий на территории РС (Я) и их картографического обобщения. В результате проведенных исследований на основе современных технологий и программ были составлены детальные карты-схемы районирования территории РС (Я) по отдельным видам инженерно-геокриологических условий: рельефу, криогенным процессам, грунтовым условиям, пластическим свойствам грунтов – учитывающих температуру и льдистость, гидрогеологическим особенностям и сейсмичности территории. Каждая из составленных карт-схем представляет собой самостоятельный предмет для анализа. Статья начинается кратким введением, в котором раскрываются цель и актуальность исследования, а также даны общие понятия инженерно-геокриологическим условиям и районированию территории. Последующий раздел «Методика работ» освещает проведение ранжирования видов инженерно-геокриологических условий для удобства районирования. В разделе «Результаты исследования и их обсуждение» приведены факторы формирования инженерно-геокриологических условий территории Республики Саха (Якутия), такие как геодинамический, морфоструктурный, геокриологический, гидрогеологический и сейсмичность территории. Проведен комплексный анализ разновидностей инженерно-геокриологических условий и выделены территории, в различной степени благоприятные для осуществления инженерной деятельности. В заключении указывается, что исключительно сложным в инженерном отношении является регион Приморской низменности и мелководного шельфа. В дальнейшем для уточнения инженерных условий представляется рациональным составление мерзлотно-ландшафтной и геоморфологической карты территории РС (Я) и других карт, которые позволят оценить экономическую целесообразность различных видов инженерной деятельности на территории Республики.

Ключевые слова: температура грунтов, экзогенные процессы, сейсмичность, морфоструктура, грунтовые условия, криогенные процессы, инженерно-геокриологические условия, мерзлые грунты, районирование

**APPROACHES TO ENGINEERING AND GEOCRYOLOGICAL MAPPING
OF THE REPUBLIC OF SAKHA (YAKUTIA)****Shestakova A.A., Spektor V.B., Torgovkin Ya.I.***Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: aashest@mail.ru,
vbspector@mpi.ysn.ru, torgovkin@mpi.ysn.ru*

Engineering and geocryological zoning of the Republic of Sakha (Yakutia) is considered in the work, which was performed based on the analysis of the main factors controlling engineering and geocryological conditions in the region and their cartographic generalization. The schematic maps of zoning are made: relief (morphostructural), cryogenic processes, ground conditions, geocryological conditions and seismicity. The article begins with a short «Introduction», in which the goals and relevance of the work, as well as general concepts of geocryological conditions and zoning of the territory. The following section «Methods of work» highlights the ranking of the types of engineering and geocryological conditions for the convenience of zoning. In the section «Results of the study and their discussion», the factors forming the engineering and geocryological conditions of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) are considered, such as geodynamic, morphostructural, geocryological, hydrogeological and seismicity of the territory. A complex analysis of varieties of engineering and geocryological conditions is also given and territories were identified in various degrees favorable for the implementation of engineering activities. In the «Conclusions» section it is indicated that the region of the Primorsky lowland and shallow shelf is exceptionally difficult in engineering terms. In the future, to clarify the engineering conditions, it seems rational to compile a permafrost-landscape and geomorphological map of the territory of the RS (Y), and other maps that will enable us to assess the economic feasibility of various types of engineering activities on the territory of the Republic.

Keywords: ground temperature, exogenous processes, seismicity, morphostructural, ground conditions, cryogenic processes, engineering and geocryological conditions, frozen ground, zoning

Инженерно-геокриологическое районирование является одним из методов инженерной геокриологии, объектом которого является геологическая среда криолитозоны, взаимодействующая с инженерными сооружениями.

Целью работы является проведение инженерно-геокриологического районирования в связи с ускорением освоения северных (в том числе арктических) территорий, необходимостью информационного обеспечения

планирования инженерной деятельности на территории РС (Я), принятия принципиальных решений по размещению объектов строительства и направлениям магистральных транспортных и инженерных коммуникаций, основ генеральных схем инженерной защиты от опасных геологических процессов, оценки эффективности строительства и эксплуатации крупных инженерных сооружений на территории РС (Я), предотвращения критических технических и экологических ситуаций.

Под инженерно-геокриологическим районированием понимается пространственная оценка территории с точки зрения изменчивости инженерно-геокриологических условий [1]. Инженерно-геокриологические условия определяются свойствами мерзлых и оттаивающих пород, развитием мерзлотно-геологических процессов, состоянием горизонтов межмерзлотных и подмерзлотных вод, быстрой временной изменчивостью температурного поля пород [2]. Анализ инженерно-геокриологических условий проведен на глубину 10–20 м, соответствующую зоне взаимодействия большинства инженерных сооружений, возводимых и планируемых на территории РС (Я), с криолитозонной. Этот же диапазон глубин совпадает с мощностью слоя годовых колебаний температур криолитозоны территории.

Материалы и методы исследования

Задачи инженерно-геокриологического районирования решены с помощью построения карт-схем, отражающих разные виды инженерно-геологических условий: 1 – строение рельефа; 2 – опасные геокриологические процессы (экзодинамической); 3 – грунтовые условия; 4 – геокриологические условия; 5 – гидрогеологические условия; 6 – сейсмические условия. Карты-схемы составлены в электронном варианте в формате «ArcGIS 10 version 10.1» [3–5]. Для удобства районирования проведено ранжирование видов инженерно-геокриологических условий. Наивысший классификационный таксон – в ранге региона – был присвоен наиболее крупным элементам рельефа. Второй ранг – провинции – также закреплен за менее крупными элементами рельефа и тесно с ними связанными криогенными процессами. Третий, более низкий по уровню таксономический уровень – ранг областей – был закреплен за грунтовой составляющей. Ранг районов был присвоен криогенной составляющей инженерно-геокриологических условий. Вне ранжирования на схемах-врезках показаны гидрогеологическая составляющая инженерно-геокриологических условий и сейсмичность.

Результаты исследования и их обсуждение

На формирование инженерно-геологических условий влияют, прежде всего, геодинамический, морфоструктурный, геокриологический и гидрогеологический факторы, которые объединяются геодинамической обстановкой и климатической

зональностью [6]. Все факторы взаимосвязаны и, каждый в отдельности и все вместе, влияют на рельеф, экзогенные процессы, на состав, свойства, температуру и размещение дисперсных грунтов и в конечном итоге на весь комплекс инженерно-геокриологических условий.

Рассмотрим карты-схемы инженерно-геокриологического районирования территории РС (Я) по отдельным видам инженерно-геокриологических условий.

Морфоструктурное (геоморфологическое) районирование территории Республики Саха (Якутия) (рис. 1). Районирование территории РС (Я) проведено по морфоструктурному принципу. В соответствии с размерами рассматриваемой территории морфоструктуры (регионы) приняты авторами в качестве таксонов первого порядка. В пределах территории РС (Я) выделено 5 регионов: I – регион Приморских равнин и низменностей и мелководного шельфа представляет собой четко выраженную в современном рельефе наиболее низкую морфологическую ступень (отрицательную морфоструктуру); II – регион равнин и плато Средней Сибири включает 30 провинций и охватывает две разные категории морфоструктур: равнины и разновысокие плато, на которых существенно различаются все виды инженерно-геокриологических условий; III – Байкало-Становой регион характеризуется высоким рельефом, высокой современной тектонической активностью, что обуславливает здесь широкое распространение обвалов, в том числе и сейсмогенных, осыпей, оползней, курумов (интенсивность 4–5 баллов); IV – Верхояно-Чукотский регион характеризуется горным рельефом и, соответственно, развитием обвально-осыпных процессов (4–5 баллов); V – Трансрегиональные области представлены долинами крупных рек – Лены, Индигирки и Колымы [7].

Предлагаемая классификация близка к предлагаемой в работе [2]. В зависимости от высотного положения вершинной поверхности, размеров морфоструктур, их пространственного положения и ландшафтными особенностями, выделенные регионы разделяются на менее крупные таксоны – провинции. Всего на карте-схеме морфоструктурного районирования выделено в составе 5 регионов около 90 провинций. Выделенные типы провинций были внесены в таблицу, где в баллах оценена сравнительная степень сложности инженерных условий (при прочих равных условиях) в зависимости от сложности рельефа на основных видах морфоструктурных регионов и провинций.

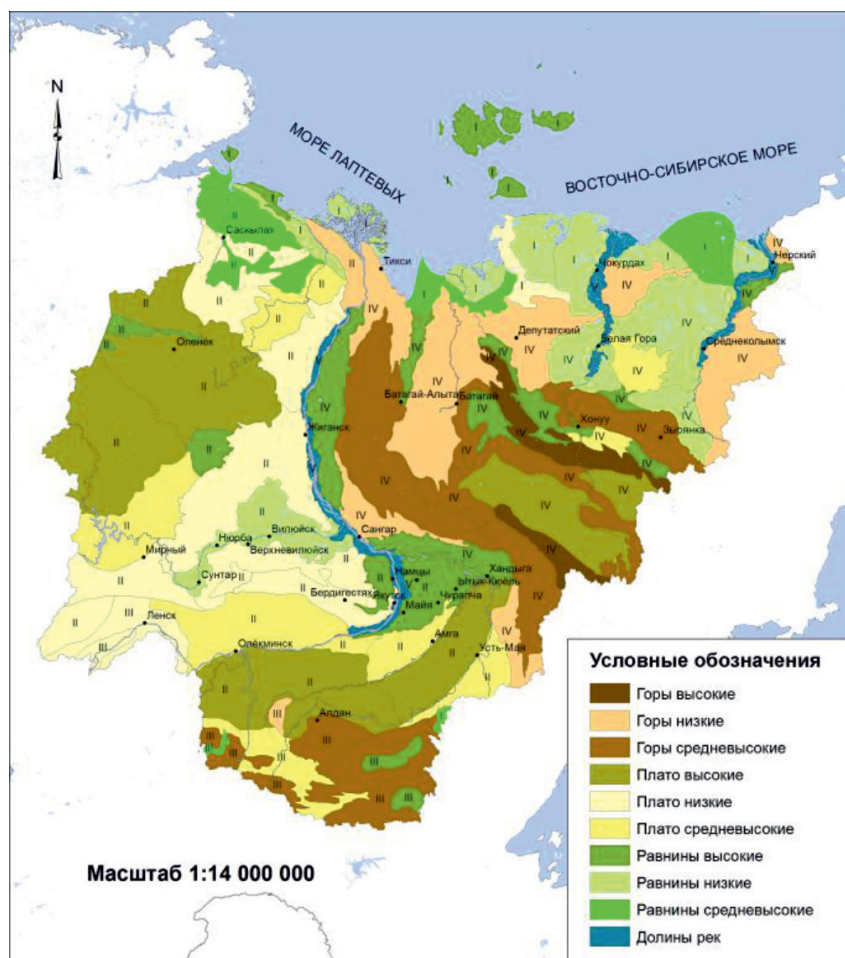


Рис. 1. Карта-схема морфоструктурного (геоморфологического) районирования

Районирование территории Республики Саха (Якутия) по интенсивности криогенных процессов (рис. 2). Оценка степени опасности криогенных процессов (для наземного строительства) выполнена в соответствии с классификацией, разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ [2]. По степени опасности криогенные процессы разделяются на следующие классы: незначительно опасные – 1 класс; малоопасные – 2 класс; умеренно опасные – 3 класс; опасные – 4 класс; чрезвычайно опасные – 5 класс. Виды криогенных процессов и их интенсивность проявления оценены авторами на основании собственных предшествующих геокриологических и геоморфологических исследований на территории РС (Я). Классификация интенсивности проявления процессов по площади была проведена по методике, изложенной в работе [2, табл. 5.3, с. 188]. На карте-схеме интенсивность экзогенных

(криогенных) процессов показана цветом. На основе анализа интенсивности криогенных процессов проведена сравнительная оценка выделенных регионов по этому показателю.

На территории суши рассматриваемого региона распространены преимущественно высокольдистые грунты ледового комплекса, имеющие оценку сложности 10 баллов. Высокая сейсмичность свойственна в основном акватории моря Лаптевых. Скорость криогенных процессов на этой территории представляется недостаточно оцененной. Наибольшую опасность здесь представляют термокарстовые процессы. Их средняя скорость (0,5–2 м/год) может быть оценена исходя из размеров наиболее крупных из них (5–20 км) и периода голоценового потепления (10 тыс. л), наступившего после сартанского оледенения. В действительности современные скорости термокарста могут быть значительно выше в силу положитель-

ных обратных связей температур приземного слоя воздуха и процесса термокарста. В частности, скорость современных термоабразионных процессов достигает в отдельные годы первых десятков метров. Требуется дальнейшего уточнения и фактор эндогенной динамики рельефа. Некоторые наблюдения указывают на обусловленность эндогенных движений поверхности в зависимости от изменений климата. В частности, побережье моря Лаптевых, по данным повторных геодезических измерений, испытывает современные положительные движения, связанные с гляциоизостатическим поднятием. С учетом этих явлений оценка сложности инженерных условий на Приморской низменности может быть увеличена.

Районирование территории Республики Саха (Якутия) по грунтовым условиям (рис. 3). Для задач районирования грунтовых условий столь большой территории ранг грунтовых таксонов был ограничен

классом и группой грунтов. Дополнительно были выделены переходные группы – сочетания карбонатных и терригенных грунтов, сочетания дисперсных и полускальных грунтов, двуслойные разрезы.

Районирование Республики Саха (Якутия) по геокриологическим условиям. Определяющим критерием состояния мерзлых грунтов, для строительства наземных сооружений, показан интервал температур равный $0 \div -2^\circ\text{C}$. Этот интервал температур контролирует пластические свойства мерзлых грунтов, определяя их твердомерзлое и пластично-мерзлое состояние (табл. 1). Кроме них на карте выделяются охлажденные и морозные грунты (рис. 4). Небольшие площади на юге территории, на участках островной и прерывистой мерзлоты, могут находиться и в талом состоянии. В скобках приведена оценка усложнения инженерно-геологических условий в зависимости от льдистости и температуры грунтов.

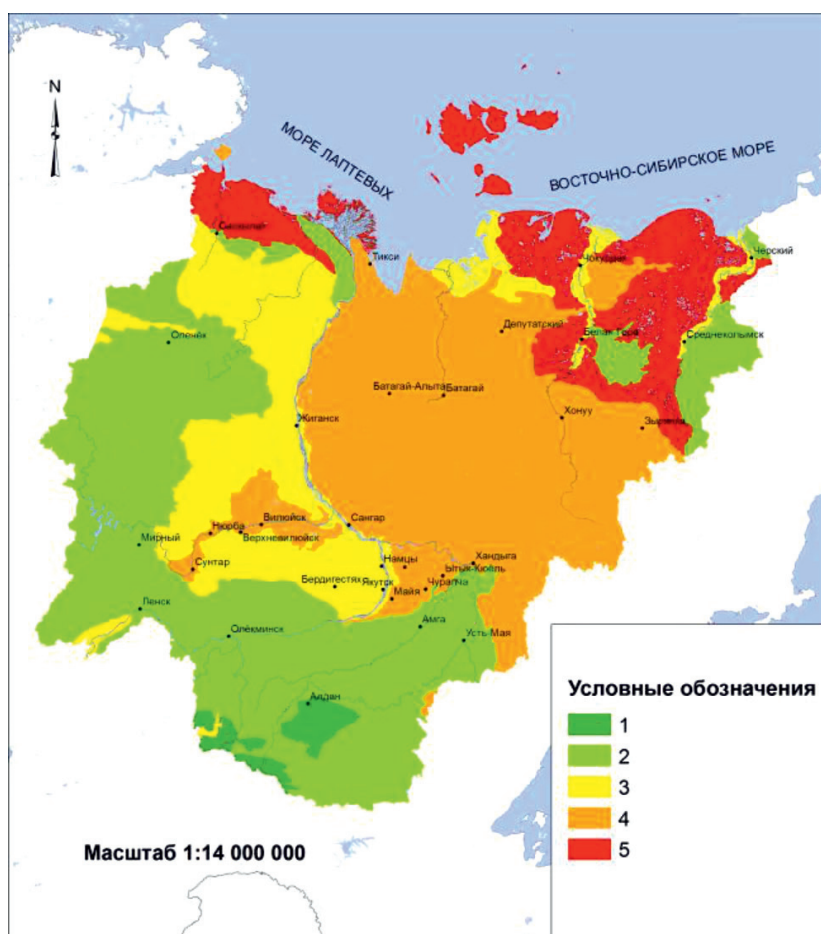


Рис. 2. Карта-схема районирования по интенсивности криогенных процессов

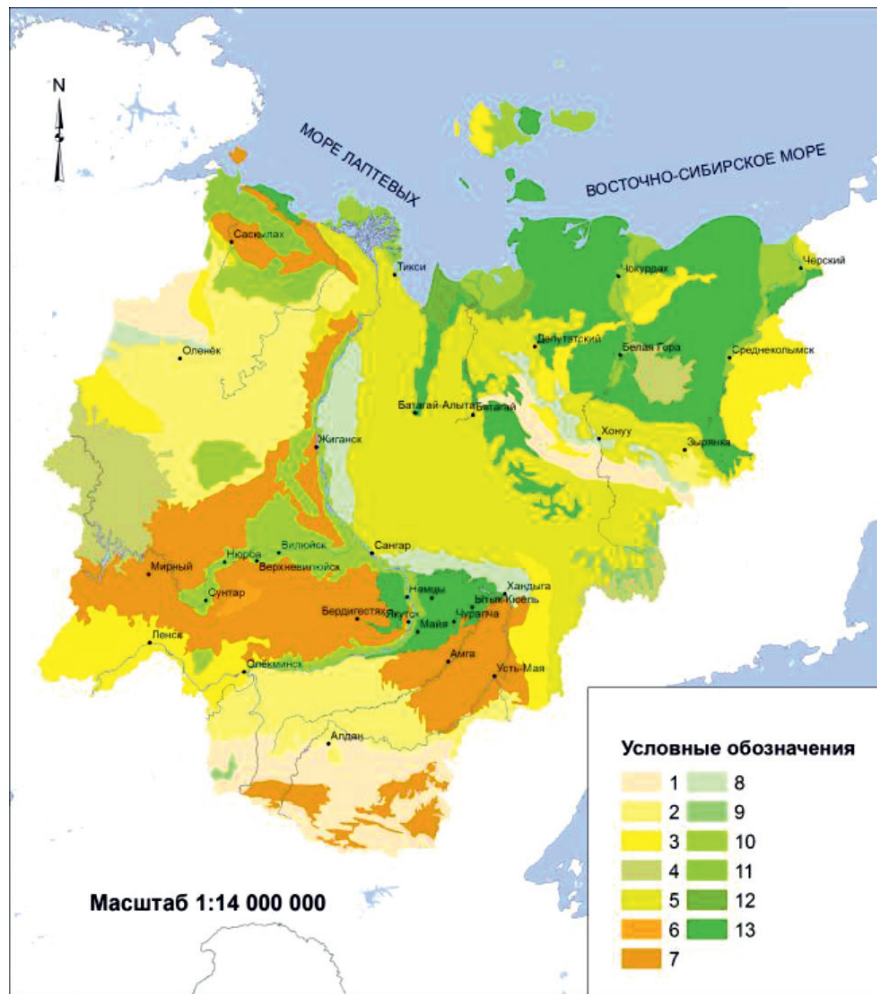


Рис. 3. Карта-схема районирования по грунтовым условиям: 1 – интрузивные, траппы, гнейсы, сланцы, роговики; 2 – известняки, доломиты; 3 – сочетание карбонатных и терригенных грунтов; 4 – туфы, лавы; 5 – переслаивание песчаников, алевролитов, аргиллитов, пласты и прослои углей; 6 – известняки, доломиты, гипс; 7 – сочетание песков, песчаных алевролитов, алевролитов, аргиллитов; 8 – щебни, галька, гравий, глыбы с песчано-суглинистым заполнителем; 9 – галечники, пески, супеси; 10 – пески, супеси с галькой, гравий, щебни; 11 – суглинки, супеси, глины, пески с гравием; 12 – илы минеральные и органические супеси, пески, торф; 13 – лессовидные суглинки, супеси, льдистые (>40%)

Районирование территории Республики Саха (Якутия) по гидрогеологическим условиям проведено по свойствам состава и агрессивности межмерзлотных и надмерзлотных вод. На большей части территории надмерзлотные воды характеризуются гидрокарбонатно-кальциевым составом и не обладают агрессивными свойствами [8]. На юго-западе территории, в Байкало-Становом регионе отмечаются выходы минерализованных вод (в среднем 4 г/л) с сульфатной агрессивностью, приуроченные к участкам развития прерывистой и островной мерзлоты.

Карта-схема сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) составлена путем деления терри-

тории по балльности землетрясений. Около 50% территории РС (Я) относится к зонам, имеющим балльность около 6 баллов и выше. На остальной части территории возможны землетрясения интенсивностью 5 баллов.

Комплексный анализ факторов инженерно-геокриологических условий. Составленные карты-схемы распространения факторов инженерно-геокриологических условий позволяют оценить относительную устойчивость выделенных элементов районирования разного таксономического ранга. Остановимся на сравнительной оценке для самых крупных единиц районирования – регионов (табл. 2).

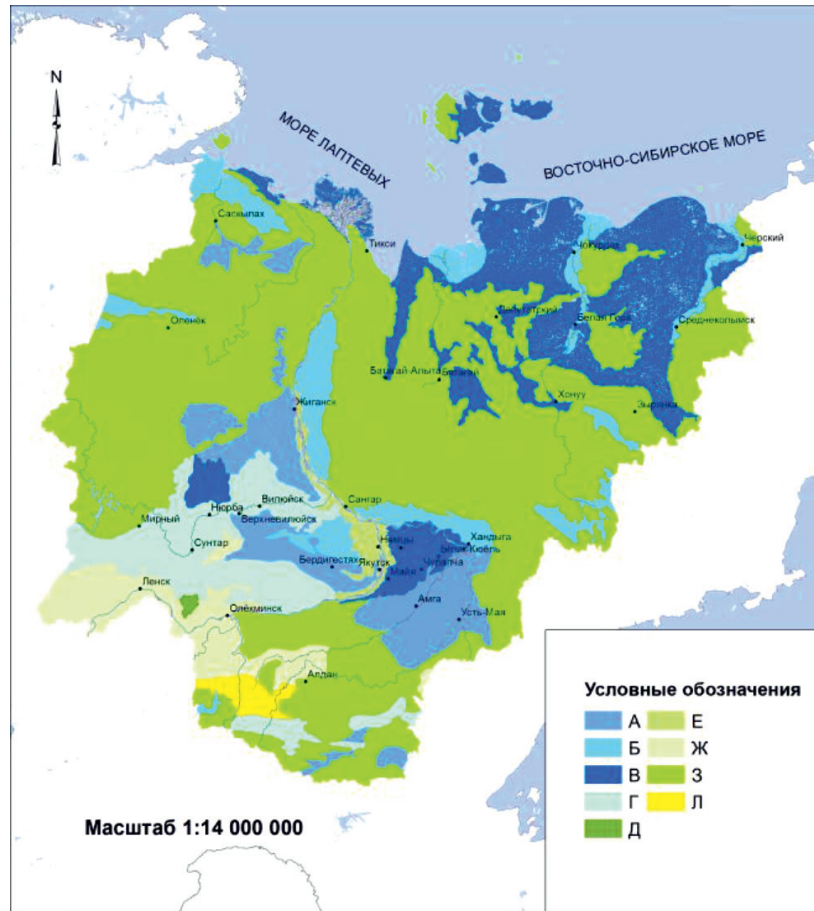


Рис. 4. Карта-схема районирования по геокриологическим условиям

Таблица 1

Характеристика геокриологических условий

Состав грунтов	Температура грунтов, °С	Состояние грунтов	Льдистость грунтов		
			Слабая	Средняя	Сильная
Дисперсные	Ниже -2°	твёрдо-мерзлые	А (1)	Б (2)	В (4)
	$0 \div -2^{\circ}$ С	пластично-мерзлые	Г (2)	Д (3)	Е (5)
Скальные и полускальные	Ниже -0° С	охлажденные	Ж (4)		
		мерзлые	З (0)	И (1)	К (2)
	Выше 0° С	талые	Л (1)		

Таблица 2

Сравнительная оценка сложности инженерно-геокриологических условий

Регион	Сложность инженерно-геокриологических условий в баллах						
	Рельеф	Криогенные процессы	Грунтовые условия	Криологические условия	Гидрологические условия	Сейсмические условия	Сумма баллов
I. Приморских равнин и низменностей и мелководного шельфа	4	5	10	4	1	9	33
II. Равнин и плато Средней Сибири	3	3	6	4	3	5	24
III. Байкало-Станового складчато-надвигового пояса	9	2	6	4	3	9	33
IV. Верхояно-Чукотский	12	4	2	1	1	9	29
V. Трансрегиональные регионы – долины крупных рек	4	3	7	1	1	7	23

Подход к оценке условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений в условиях криолитозоны заимствован из известных работ [2]. Исходные данные о сложности разных видов условий по выделенным регионам приведены на рис. 1–4.

Заключение

Таким образом, инженерно-геокриологическое районирование территории Республики Саха (Якутия) посредством анализа основных факторов формирования инженерно-геокриологических условий на территории Республики показало, что наиболее благоприятными инженерно-геокриологическими условиями характеризуются долины крупных магистральных рек (23 балла) и близкие к ним по оценке равнины и плато Средней Сибири (Центральная Якутия). Наихудшие условия инженерной деятельности имеют место в регионе приморских равнин и низменностей и мелководного шельфа, а также Байкало-Станового пояса, которые характеризуются сложностью около 33 баллов. Эта сложность обусловлена грунтовыми и динамическими условиями.

Необходимо отметить, что данная оценка является сугубо ориентировочной, основанной на приблизительных оценках сложности и не учитывает экономического значения регионов.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-05-41079.

Список литературы / References

1. Трофимов В.Т., Красилова Н.С. Инженерно-геологические карты: учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 384 с.
Trofimov V.T., Krasilova N.S. Engineering-geological maps: study guide. M.: KDU, 2007. 384 p. (in Russian).

2. Ершов Э.Д. Основы геокриологии. Ч. 5: Инженерная геокриология. М.: Изд-во МГУ, 1999. 526 с.

Ershov E.D. Fundamentals of Geocryology. Part 5: Engineering Geocryology. M.: Izd-vo MGU, 1999. 526 p. (in Russian).

3. Современная инженерно-геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:2500000 / ВСЕГИНГЕО, Росгеолфонды, 2011. URL: <http://900igr.net/prezentacija/geografija/sovremennaja-inzhenerno-geologicheskaja-karta-territorii-rossijskoj-federatsii-masshtaba-12-500-000-105189.html> (дата обращения: 08.11.2018).

Modern Engineering Geological Map of the Russian Federation Scale 1: 2500000 / VSEGINNGEO, Rosgeolfondy, 2011. URL: <http://900igr.net/prezentacija/geografija/sovremennaja-inzhenerno-geologicheskaja-karta-territorii-rossijskoj-federatsii-masshtaba-12-500-000-105189.html> (date of access: 08.11.2018) (in Russian).

4. Козловский С.В. Методические аспекты, принципы и последовательность организации геоинформационной системы (ГИС) в инженерной геологии // Инженерная геология. 2010. № 1. С.18–22.

Kozlovsky S.V. Methodical aspects, principles and sequence of organization of a geographic information system (GIS) in Engineering Geology // Inzhenernaya Geologiya. 2010. № 1. P. 18–22 (in Russian).

5. Козловский С.В. Теория и практика создания геоинформационной системы в инженерной геологии. автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Москва, 2010. 39 с.

Kozlovsky S.V. The theory and practice of creating a geographic information system in Engineering Geology. Avtoref. dis. ... dokt. geol.-mineral. nauk. Moskva, 2010. 39 p. (in Russian).

6. Трофимов В.Т., Аверкина Т.И. Теоретические основы региональной инженерной геологии. М.: ГЕОС, 2007. 464 с.

Trofimov V.T., Averkina T.I. Theoretical Foundations of Regional Engineering Geology. M.: GEOS, 2007. 464 p. (in Russian).

7. Спектор В.Б., Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Спектор В.В. Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 28–37.

Spector V.B., Shestakova A.A., Torgovkin Ya.I., Spector V.V. Engineering Geological Map of the Republic of Sakha (Yakutia) // Inzhenernaya geologia. 2017. № 2. P. 28–37 (in Russian).

8. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. 169 с.

Shepelev V.V. Permafrost waters of the cryolithozone. Novosibirsk: Akad. izd-vo «Geo», 2011. 169 p. (in Russian).