

Н. А. Дружинин¹✉, О. А. Коробова¹, Л. А. Максименко²

Факторы, вызывающие анизотропию в мерзлых грунтах, и их влияние на поведение грунтов при эксплуатации

¹Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: druzhininnikita@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены основные факторы, вызывающие анизотропию мерзлых грунтов, и проанализировано их влияние на поведение оснований при эксплуатации зданий и сооружений. Показано, что анизотропия мерзлых грунтов формируется под воздействием совокупности взаимосвязанных причин, к которым относятся криогенная структура и текстура, условия промерзания, наличие незамерзшей воды, засоленность и химический состав поровой воды, циклы промерзания – оттаивания, а также исходная осадочная слоистость. Установлено, что совместное действие этих факторов приводит к направленной неоднородности прочностных, деформационных и реологических свойств мерзлого массива. В работе отмечено, что в эксплуатационных условиях анизотропия проявляется в неравномерном восприятии нагрузки основанием, локализации деформаций по ослабленным направлениям, снижении сопротивления сдвигу, усилении ползучести и повышении вероятности дифференциальных осадков при тепловом воздействии и изменении фазового состояния грунта. Сделан вывод о том, что учет анизотропии мерзлых грунтов является необходимым условием для достоверной оценки работы оснований и повышения надежности проектных решений в районах распространения мерзлых грунтов.

Ключевые слова: криогенная структура, криогенная текстура, основания зданий и сооружений, деформируемость, криолитозона

N. A. Druzhinin¹✉, O. A. Korobova¹, L. A. Maksimenko²

Factors causing anisotropy in frozen soils and their influence on soil behavior during operation

¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: druzhininnikita@gmail.com

Abstract. The article examines the main factors causing anisotropy in frozen soils and analyzes their influence on the behavior of foundations during the operation of buildings and structures. It is shown that anisotropy in frozen soils is formed under the combined influence of interrelated factors, including cryogenic structure and texture, freezing conditions, the presence of unfrozen water, salinity and chemical composition of pore water, freeze–thaw cycles, as well as initial sedimentary layering. It has been established that the combined action of these factors leads to directional heterogeneity in the strength, deformation, and rheological properties of the frozen soil mass. The study notes that under operational conditions anisotropy is manifested in the non-uniform perception of loads by the foundation, localization of deformations along weakened directions, reduction in shear resistance,

intensification of creep, and an increased probability of differential settlements under thermal effects and changes in the phase state of the soil. It is concluded that accounting for anisotropy in frozen soils is a necessary condition for a more reliable assessment of foundation performance and for improving the reliability of design solutions in regions where frozen soils are widespread.

Keywords: cryogenic structure, cryogenic texture, building and structure foundations, deformability, cryolithozone

Введение

В настоящее время строительство в районах распространения мерзлых грунтов приобретает особую актуальность в связи с продолжающимся освоением северных широт и арктической зоны, развитием опорных населенных пунктов, транспортной, промышленной и энергетической инфраструктуры. В России эта тенденция закреплена на государственном уровне: действуют стратегические документы по развитию арктической зоны до 2035 года, а в 2025 году были утверждены долгосрочные комплексные планы развития арктических городов и агломераций с общим объемом финансирования 2,9 трлн рублей.

Эксплуатационная надежность сооружений в криолитозоне определяется не только фактом наличия мерзлого основания, но и характером его изменения во времени. По оценкам экспертов по изменению климата (IPCC), деградация мерзлоты уже рассматривается как фактор дестабилизации грунтов и инфраструктуры, а к середине XXI века значительная часть арктической инфраструктуры окажется в зонах риска, связанных с оттаиванием мерзлоты и просадками поверхности.

В этих условиях особенно важным становится учет анизотропии мерзлых грунтов. Реальные мерзлые основания обладают направленной неоднородностью, обусловленной рядом факторов, совокупное действие которых приводит к различию прочности и деформируемости по направлениям, а при эксплуатации – к неравномерному восприятию нагрузки, локализации деформаций и дифференциальным осадкам.

Методы и материалы

Факторы анизотропии мерзлых грунтов. Рассмотрение мерзлого грунта, как условно изотропной среды, не всегда позволяет корректно описать работу основания под зданием или сооружением. Поэтому анализ факторов, вызывающих анизотропию, мерзлых грунтов, и оценка их влияния на поведение оснований при эксплуатации являются необходимыми как для уточнения инженерных представлений о работе мерзлых оснований, так и для повышения надежности проектных решений. *Криогенная структура* описывает строение массива или образца грунта в плане геометрии и неоднородностей (слои, линзы, жилы, зоны разной льдистости и т.п.) – то есть расположение и форму крупных элементов [1]. Криогенная структура включает в себя:

- 1) слои – элементы строения, отличающиеся типом грунта, льдистостью;
- 2) прослойки – тонкие «вставки» внутри слоя, которые резко отличаются от основного материала;

3) линзы льда – ледяные включения, имеющие двояковыпуклую форму;
4) жильный лёд – «стенки» льда (ледяные жилы), которые могут образовывать сетку в плане;

5) неоднородную льдистость по разрезу – это распределение льда по глубине и по площади, которое может быть как ступенчатым, так и плавным.

Криогенная структура говорит о наличии плоскостей и направлений, по которым легче развиваются деформации: в одном направлении мерзлый грунт жёстче, но при этом в другом направлении он более податлив. Например, вдоль ледяных прослоев или слоев с большей льдистостью проще развиваются деформации сдвига, в то время как поперек массив грунта будет более жестким, т.к. слои включаются в работу совместно. Если структура грунта включает в себя ледяные линзы, то они являются потенциально опасными факторами, которые могут – в случае оттаивания приводить к локальному увеличению как вертикальных, так и горизонтальных деформаций.

Криогенная текстура – это взаиморасположение и ориентация ледяной составляющей, узор распределения льда внутри мерзлого грунта. Выделяют четыре вида криогенных текстур:

1) массивная – характеризуется полным или частичным заполнением пор грунта льдом-цементом;

2) слоистая – образована параллельными друг другу шлирами льда;

3) сетчатая – возникает, в случае если шлиры льда образуют решетчатые формы в мерзлом массиве;

4) ячеистая – является разновидностью сетчатой текстуры, в которой ледяные шлиры образуют замкнутые контуры, разделяющие грунт на ячейки [1].

Криогенная текстура определяет ориентацию «слабых» плоскостей внутри слоёв мёрзлого грунта, из-за чего один и тот же слой может обладать разной жёсткостью в зависимости от направления, что особенно ярко выражено для слоистой текстуры. В случае массивной, сетчатой и ячеистой текстур анизотропия может быть выражена слабее, если, соответственно, распределение льда в порах равномерно, сетка или ячейки примерно одинаковы во всех направлениях. В общем случае ориентированные прожилки льда создают направления, по которым материал легче деформируется, сдвигается и разрушается, а при оттаивании превращаются в направленные зоны ослабления.

Условия промерзания. Условия промерзания (направление и скорость фронта промерзания, наличие водоподпитки и неоднородность тепло-влажностного режима) массива грунта являются одним из ключевых факторов формирования анизотропии мерзлых грунтов. Поскольку промерзание обычно протекает направленно (сверху вниз) в грунте формируются ориентированные элементы криогенного строения. При наличии миграции грунтовой воды к фронту промерзания развивается сегрегационное льдообразование, приводящее к возникновению линз и прослоев сегрегационного льда, ориентированных параллельно фронту промерзания. Такие элементы создают «предпочтительные» плоскости деформации и разрушения: сопротивление сдвигу и деформируемость вдоль них отличается от значений в направлении поперёк прослоев. В случае медленного

промерзания у грунтовой воды больше времени для миграции к фронту, накоплению и образованию сегрегационного льда в виде линз или прослоев. Таким образом, в этом случае почти наверняка образуется слоистая криогенная текстура, анизотропный характер которой выражен сильнее, чем у массивной, возникающей при быстром промерзании. Кроме того, пространственная неравномерность промерзания по площади участка (влияние снегового покрова, дренажа, растительности и техногенных тепловых источников) приводит к неодинаковому развитию сегрегационного льда и, как следствие, к сочетанию направленной анизотропии и неоднородности свойств основания, что повышает риск различных деформаций при эксплуатации сооружений [1, 2].

Наличие незамерзшей воды. Незамерзшая вода представляет собой часть поровой влаги, которая сохраняется в жидком состоянии при отрицательных температурах. Её наличие обусловлено физико-химической связью воды с поверхностью частиц грунта (вода образует «плёнку» вокруг частиц), капиллярными эффектами в тонкопористой среде, а также понижением температуры замерзания в зависимости от минерализации поровой воды. Количество незамерзшей воды существенно зависит от гранулометрического состава (в дисперсных грунтах её количество возрастает за счет большой суммарной площади поверхности частиц), химического состава поровой воды и температуры. Кроме того, количество незамерзшей воды особенно чувствительно к изменению температуры (при температурах, близких к 0 °C): небольшие изменения температуры способны вызвать заметное изменение доли незамерзшей воды, и, следовательно, механических свойств мерзлого грунта [1].

Наличие незамерзшей воды влияет на анизотропию мерзлых грунтов как напрямую (содержание незамерзшей воды может быть неоднородным), так и косвенно (за счет усиления структурно обусловленной анизотропии). В мерзлой породе вблизи поверхности ледяных образований возникает тонкий слой влаги, обусловленный высокой поверхностной энергией и гидрофильностью льда. Увеличение доли воды в жидком состоянии снижает «цементацию» льдом контактов между частицами и повышает их подвижность, что приводит к уменьшению сопротивления сдвигу и увеличению деформируемости. В мерзлых грунтах со слоистой криогенной текстурой это ослабление проявляется преимущественно вдоль «слабых» плоскостей, вдоль которых деформирование и разрушение реализуются легче. В результате различия прочности и деформируемости вдоль и поперек ориентированных элементов строения становятся более выраженными, т.е. усиливается анизотропия механических свойств [3].

Дополнительный вклад в анизотропию вносит направленная неоднородность температурного поля в массиве. Поскольку содержание незамерзшей воды определяется температурой, то при наличии температурных градиентов (например, по глубине, а также в зоне влияния зданий и инженерных сетей) возникают зоны повышенного содержания воды в жидком состоянии и пониженной прочности, ориентированные в соответствии с полем температур. Это повышает вероятность локализации деформаций и способствует дифференциальному характеру осадок. Кроме того, незамерзшая вода усиливает реологические эффекты: рост доли незамерзшей воды уве-

личивает склонность мерзлого грунта к ползучести, а в слоистых средах и при ориентированном строении приводит к различным скоростям длительных деформаций по направлениям (реологическая анизотропия) [4].

Засоленность и химический состав поровой воды. Засоленность и химический состав поровой воды характеризуют содержание и тип растворённых в ней солей. В инженерно-геокриологическом отношении этот фактор важен тем, что минерализация изменяет условия фазовых превращений: солёная поровая вода при отрицательных температурах может сохраняться в виде раствора, а замерзать при более низких. Следовательно, при одинаковой температуре мерзлого массива разные участки и горизонты могут находиться в неодинаковом фазовом состоянии: в малозасоленных слоях доля льда выше, а в засоленных – выше доля незамерзшей жидкости [3].

Засоленность способствует формированию анизотропии прежде всего через направленную неоднородность по разрезу и по площади. Как правило, минерализация поровой воды неравномерна и часто приурочена к определенным слоям (например, к морским и прибрежным отложениям, водоносным прослоям и др.) В результате возникают «слабые» горизонты, где повышенное содержание рассола уменьшает роль цементации льдом частиц грунта, снижает сопротивление сдвигу и увеличивает деформируемость по сравнению с соседними, менее засоленными слоями. При слоистом строении такой контраст приводит к тому, что поведение массива становится направленно неоднородным: деформации и разрушение чаще локализуются в более засоленных горизонтах.

Дополнительный инженерный аспект заключается в высокой чувствительности засоленных мерзлых грунтов к небольшим изменениям температуры: при локальном потеплении (например, в зоне влияния здания или иных инженерных сооружений) доля воды в жидкой фазе в засоленных слоях может возрасти быстрее, чем в пресных. Это усиливает контраст свойств и повышает вероятность различных деформаций основания [3].

Циклы промерзания-оттаивания. Циклы промерзания-оттаивания представляют собой повторяющиеся изменения фазового состояния поровой влаги в грунте, происходящие при сезонных колебаниях температуры или при техногенных тепловых воздействиях. В ходе каждого цикла часть воды превращается в лёд при промерзании и вновь переходит в жидкое состояние при оттаивании. Эти переходы сопровождаются изменением объёма, перераспределением влаги и перестройкой контактов между частицами, что приводит к постепенному накоплению изменений в строении грунта [5].

Многократное повторение циклов оказывает влияние на анизотропию мерзлого грунта прежде всего за счет того, что перестройка структуры и развитие микроповреждений происходят неравномерно во всех направлениях: деформации и микротрещины чаще развиваются по существующим «предпочтительным» направлениям – вдоль границ слоев, по контактам «лёд-грунт», а также вдоль трещин и ослабленных прослоев. При очередном промерзании вода, перераспределённая в период оттаивания, может замерзать преимущественно в тех же зонах, что способствует формированию новых или усилению существующих

ориентированных элементов (тонких ледяных прожилок, линз и т.п.). В результате увеличивается контраст свойств по слоям и усиливается различие прочности и деформируемости вдоль и поперёк ориентированных элементов строения.

Дополнительно следует учитывать, что циклы промерзания-оттаивания обычно затрагивают верхнюю часть разреза (активный слой) и развиваются по глубине неравномерно. Это формирует направленную неоднородность состояния по разрезу и повышает чувствительность приповерхностных горизонтов к сезонным деформациям [4].

Исходная осадочная слоистость. Исходная (допромерзлая) осадочная слоистость и ориентировка частиц задают направленность строения массива ещё на стадии его накопления и уплотнения. Осадочная слоистость формируется при отложении грунтов в водных или субаэральных условиях и проявляется в виде чередования горизонтов и тонких прослоев различного гранулометрического состава, а также различной плотности, влажности и проницаемости. Такая слоистость обычно имеет выраженную ориентацию и определяет наличие плоскостей и границ раздела, вдоль которых условия деформирования и разрушения отличаются от условий в направлении поперек напластования [6].

Ориентировка частиц наиболее характерна для дисперсных грунтов (суглинков и глин), содержащих пластинчатые фракции. В процессе осаждения и последующего уплотнения такие частицы стремятся располагаться преимущественно параллельно плоскостям напластования, что формирует «наследуемую» направленность микроструктуры. При оттаивании это проявляется в различии фильтрационных и деформационных свойств по направлениям; в мерзлом состоянии данная направленность сохраняется и может усиливаться, поскольку прочность и деформируемость начинают определяться не только межчастичным трением, но и характером цементации частиц грунта льдом и количеством незамерзшей воды на контактах [6].

При промерзании слоисто-текстурная неоднородность исходного грунта влияет на распределение влаги и характер образования льда. Прослой с различной влажностью и проницаемостью по-разному участвуют в миграции воды к фронту промерзания: в одних горизонтах формируются зоны повышенной льдистости и элементы сегрегационного льда (линзы и прослой), тогда как в других льдообразование носит более поровый и равномерный характер. В результате исходная осадочная слоистость часто трансформируется в контраст льдистости по разрезу, а границы слоев и прослоев становятся «предпочтительными» направлениями локализации деформаций и разрушения. Для слоистых мерзлых толщ это означает, что сопротивление сдвигу и деформируемость вдоль напластования могут существенно отличаться от значений в направлении поперек слоев, а при изменении температуры и частичном оттаивании деформации могут приобретать дифференциальный характер, привязанный к распределению слоев и их льдистости [1].

Результаты

Влияние описанных факторов на поведение грунтов при эксплуатации зданий и сооружений. При эксплуатации зданий и сооружений мерзлые грунты работают не

как однородная среда, а как направленно неоднородный массив, в котором свойства различаются в зависимости от ориентации ледяных включений, текстурных элементов и зон различного фазового состояния [3,7]. Поэтому поведение такого основания определяется не только значениями прочности и деформируемости, но и тем, насколько эти свойства различаются по направлениям, в каком направлении относительно строения массива передаются нагрузки, развиваются деформации, распространяется оттаивание и перераспределяется влага. Иначе говоря, анизотропия превращает основание из «условно однородного» материала в систему с предпочтительными направлениями работы, ослабления и разрушения.

В эксплуатационных условиях это прежде всего проявляется в том, что нагрузка от зданий или сооружений воспринимается основанием неравномерно. Если в грунте имеются ориентированные ледяные прослои, линзы, зоны повышенной льдистости, слоистые или сетчатые криотекстуры, то деформации концентрируются не случайно, а по тем направлениям, где сопротивление меньше. В одном направлении грунт может работать относительно жестко, поскольку слои и прослои вовлекаются в совместную работу, тогда как в другом направлении, совпадающем со слабыми контактами и ориентированными элементами строения, легче развиваются сдвиг, расслоение и локальная потеря устойчивости. В результате основание под сооружением даёт не равномерную осадку, а осадку с выраженной направленной составляющей, когда отдельные части фундамента «сажаются» по-разному и включаются в работу в разных условиях [8].

Особенно важным является то, что анизотропия мерзлых грунтов влияет не только на величину деформаций, но и на их характер. В однородной среде деформации под нагрузкой распределяются более равномерно; в анизотропной мерзлой толще они, напротив, склонны к локализации: возникают зоны концентрации деформаций, привязанные к границам слоев, ледяным прослоям, контактам «лёд - грунт» и направлениям текстур [3, 7]. Для зданий и сооружений это означает увеличение трещинообразования в конструкциях, вероятности перекоса проёмов, неравномерной работы ростверков и плит, а также возникновения дополнительных внутренних усилий в несущих элементах, которые не всегда удаётся корректно учесть, если основание рассматривается как изотропное [9].

Также влияние анизотропии проявляется при изменении температурного режима основания. Эксплуатация здания почти всегда связана с техногенным тепловым воздействием: тепло поступает от отопляемого объёма, инженерных сетей, подземных коммуникаций и т.п. В мерзлых грунтах это не просто повышает их температуру, а меняет фазовое состояние отдельных горизонтов и прослоев. Там, где больше незамерзшей воды или выше засоленность, грунт при одном и том же увеличении температуры «ослабляется» быстрее, чем в соседних зонах [6]. Из-за этого жесткость основания уменьшается неравномерно: на одних участках ещё сохраняется относительно прочная льдистая структура, в то время как на других уже увеличивается доля жидкой фазы, снижается цементация частиц грунта льдом, возрастает податливость. Это приводит к возникновению дифференциальных осадок и локальной деградации основания при эксплуатации [8].

Анизотропия также существенно влияет на сопротивление мёрзлых грунтов сдвигу. Если в массиве присутствуют ориентированные прослои сегрегацион-

ного льда, тонкие зоны повышенного содержания незамёрзшей воды или засоленные горизонты, то именно по ним будет развиваться наиболее вероятная траектория сдвига [1]. Для сооружений это наиболее важно в тех случаях, когда основание работает в условиях сложного напряженного состояния: под краевыми зонами фундаментов, в местах концентрации нагрузок, на откосах, возле выемок, в районе подпорных стен и подземных частей зданий. В таких условиях анизотропия может приводить к тому, что прочность основания оказывается существенно ниже в направлении, совпадающем с плоскостями ослабления, чем это следует из усреднённых расчётных характеристик.

Отдельно следует подчеркнуть влияние анизотропии на длительные деформации оснований зданий и сооружений. При постоянной нагрузке деформации накапливаются с течением времени и вследствие направленно неоднородного строения мёрзлых грунтов ползучесть будет развиваться неравномерно: в более льдистых, более влажных, более засоленных или текстурно ослабленных зонах длительные деформации будут протекать быстрее [9]. Это означает, что даже при отсутствии резкого оттаивания сооружение может получать медленно нарастающие крены и неравномерные осадки. Это особенно опасно тем, что такие процессы часто протекают скрыто и становятся заметны только спустя годы.

Стоит выделить и сезонные изменения в верхней части разреза мерзлого грунта. В активном слое циклы промерзания-оттаивания вызывают перераспределение влаги, перестройку контактов между частицами, развитие микротрещин и постепенное накопление повреждений. Однако все эти изменения происходят не одинаково во всех направлениях, а преимущественно по уже существующим слабым плоскостям. Поэтому сезонные циклы промерзания-оттаивания не просто ухудшают свойства мёрзлого грунта, а усиливают ранее сформированную анизотропию [5]. В инженерной практике это означает, что приповерхностная часть грунтового массива и прилегающая к сооружению зона становятся всё более чувствительными к пучению, локальному разуплотнению и дополнительному увлажнению. Особенно ярко это проявляется у отмосток, в зонах ввода коммуникаций и на участках с нарушенным дренажем.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что анизотропия мерзлых грунтов является закономерным результатом их сложного строения, фазовой неоднородности и истории формирования. Она возникает под влиянием совокупности факторов: криогенные структура и текстура, условия промерзания, наличие незамёрзшей воды, засоленность поровой воды, циклы промерзания-оттаивания и исходная осадочная слоистость. Все эти факторы действуют не изолированно, а во взаимосвязи: в основании, сложенном мерзлым грунтом, наследуемая осадочная слоистость определяет исходную направленность массива; условия промерзания «накладывают» на неё криогенную структуру и текстуру; незамёрзшая вода и засолённость задают текущее фазовое состояние и чувствительность к потеплению; сезонные циклы «промерзания-оттаивания» и эксплуатационные тепловые воздействия постепенно усиливают контраст свойств между отдельными направлениями и зонами. Поэтому анизотропия в мерзлых грунтах проявляется не как отдельный частный эффект, а как системное свойство.

во основания, определяющее характер его реакции на приложенные нагрузки, изменение температуры и время.

Анизотропия определяет не только различие прочности и деформируемости мёрзлых грунтов по направлениям, но и характер их работы в основании сооружений. Мёрзлые основания реагируют неравномерно на действие эксплуатационных нагрузок и техногенное тепловое воздействие: деформации локализуются по слабым плоскостям, осадки приобретают дифференциальный характер, снижается сопротивление сдвигу по ориентированным элементам строения, а длительные деформации и сезонные перестройки верхней части разреза грунтового массива становятся более выраженными. Следовательно, игнорирование анизотропии при инженерной оценке мерзлых грунтов может приводить к недооценке риска неравномерных осадок, локальных сдвигов, кренов и постепенного ухудшения эксплуатационных характеристик зданий и сооружений.

На практике это означает, что необходимо рассматривать мёрзлое основание не как условно однородную среду, а как направленно неоднородный массив, свойства которого зависят от строения, фазового состояния и температурного режима. При оценке работы оснований, сложенных мёрзлыми грунтами, требуется учитывать не только средние расчетные характеристики, но и ориентацию структурных и текстурных элементов, распределение незамерзшей воды и засоленность, возможность сезонной перестройки активного слоя и развитие деформаций вдоль ослабленных направлений. Такой комплексный подход позволяет обоснованно оценивать поведение мёрзлых грунтов при эксплуатации и повышает надёжность инженерных решений в районах распространения мёрзлых грунтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алванян, А. К. Геокриология : учебное пособие / А. К. Алванян, К. А. Алванян; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2020. – 139 с.
2. Брушков, А. В. Засоленные многолетнемерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. – М. : Изд-во МГУ, 1998. – 332 с.
3. Бугров, А. К. Анизотропные грунты и основания сооружений / А. К. Бугров, А. И. Голубев. – Санкт-Петербург : Недра, 1993. – 245 с. : ил.
4. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов : учебное пособие для строительных вузов / С. С. Вялов. – Москва : Высшая школа, 1978. – 447 с. : ил.
5. Методы геокриологических исследований : учебное пособие / под ред. Э. Д. Ершова. – Москва : Изд-во МГУ, 2004. – 512 с. : ил.
6. Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / под ред. Э. Д. Ершова. – Москва : Изд-во МГУ, 1999. – 526 с.
7. Пьянков, С. А. Механика грунтов : учебное пособие / С. А. Пьянков, З. К. Азизов ; Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 169 с.
8. Хименков, А. Н. Введение в структурную криологию / А. Н. Хименков, А. В. Брушков. – Москва, 2005.
9. Юшков Б.С., Третьякова О.В. Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно деформированное состояние транспортных тоннелей // Транспортные сооружения, Том 1, №3 (2014) <http://t-s.today/PDF/01TS314.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/01TS314

© Н. А. Дружинин, О. А. Коробова, Л. А. Максименко, 2026