

УДК 528.48:551.2/.3

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-28-35

## О МЕТОДИКЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА БУГРОВ ПУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

*Александр Сергеевич Репин*

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, старший преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: vip.repin2010@mail.ru

В статье приведены исторические аспекты исследований многолетнемерзлых форм рельефа. Рассмотрены техногенные и природные факторы, влияющие на развитие и деградацию бугров пучения, а также влияние бугров пучения на объекты инфраструктуры нефтегазодобывающей промышленности в районах Крайнего Севера при их эксплуатации. В статье приводятся существующие методы определения величины наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород. Выполнен анализ существующих методов и средств выполнения измерений при определении наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород. По результатам проведенных исследований и анализа материалов предложена методика геопространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих бугров пучения.

**Ключевые слова:** геопространственный мониторинг, многолетнемерзлые формы рельефа, инженерно-геодезические изыскания, линейные сооружения, деформации, нефтегазодобывающие месторождения

### *Введение*

При выполнении комплексных инженерных изысканий для проектирования, строительства, реконструкции и капитального ремонта линейных сооружений в условиях Крайнего Севера специалистам приходится учитывать особенности северных территорий [1]. В первую очередь можно выделить наличие многолетнемерзлых пород со сплошным или прерывистым (спорадическим) распространением, а также присутствие бугров пучения.

Во время поездки по Исландии в 1792 г. Свенном Палссоном на заболоченных местностях были проведены первые исследования бугров пучения многолетнемерзлых пород (ММП) [2].

При проведении исследований на Северном Урале от р. Кара до низовий р. Оби (Ямало-Ненецкий автономный округ) В. Н. Сукачев предложил гипотезу образования бугров пучения в результате выпучивания пльвунного горизонта, находящегося под слоем промерзающего торфа и границей вечной мерзлоты [3].

Одним из первых российских ученых, который провел комплексные исследования

бугров пучения и внес значительный вклад в их изучение, был А. И. Попов. Им были проведены измерения температуры грунта до глубины 20 м, определение естественной влажности и льдистости грунтов, а также выполнены исследования литологического разреза бугров пучения. Исходя из выполненных исследований, А. И. Поповым приведены морфологические и морфометрические характеристики бугров пучения и области бугрового пространства многолетнемерзлых пород [4].

Проводя исследования динамики развития и состояния бугров пучения на Возейской нефтегазоносной площади в 1975 г. и с 1976 по 1982 г. в устье р. Оби, на Ямале, Ю. К. Васильчук пришел к выводу, что в одних мерзлотно-фациальных условиях бугры растут, в других – деградируют, в третьих – являются стабильными [5, 6]. В 2004 и 2007 г. Н. Г. Москаленко и О. Е. Пономаревой по трассе газопровода Надым – Пунга проводились стационарные наблюдения за динамикой бугров пучения многолетнемерзлых пород. В результате исследований было отмечено, что развитие или деградация бугров пучения

не зависит от климатических условий и промышленной деятельности человека [7].

На современном этапе изучения многолетнемерзлых форм рельефа ведущими организациями являются географический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и Институт криосферы Земли СО РАН.

### **Методы и материалы**

Предметом исследования являются методики и технологии геодезического пространственного мониторинга многолетнемерзлых форм рельефа и инженерно-геодезических изысканий линейных сооружений в районах Крайнего Севера на территориях, подверженных природным и техногенным аномальным явлениям [8].

Геодезический пространственный мониторинг многолетнемерзлых форм рельефа является одной из составных частей мониторинга окружающей среды, состоящего из

большого количества тематических мониторингов, которые используются для определения развития различных параметров среды обитания человека [9]. При этом он является одним из наиболее сложных направлений. Для его осуществления необходимо интегрировать геодезические данные с данными геологических, геофизических наблюдений, наблюдений за динамикой изменений наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород [10].

Образование бугров пучения, особенно однолетних, вызывает деформации и существенно усложняет строительство и эксплуатацию линейных сооружений (дорог, газо- и нефтепроводов), зданий, буровых вышек и др., особенно в условиях равнин, при обустройстве нефтяных и газовых месторождений Северо-Западной Сибири [8, 11, 12]. На рис. 1 показаны бугор пучения на нефтегазовом месторождении на севере Западной Сибири и характерные влияния бугров пучения на трубопровод.



Рис. 1. Бугор пучения на нефтегазовом месторождении на севере Западной Сибири и участок трубопровода с характерным влиянием бугра пучения [2]

Строительство и эксплуатация магистральных трубопроводов в районах расположения многолетнемерзлых пород приводят к изменениям геокриологических процессов. Механическое и тепловое воздействие трубопровода на многолетнемерзлые грунты и заболоченные участки местности развивается как в непосредственной близости, так и на прилегающую территорию [5, 12]. Такие воздействия трубопроводов приводят к активизации опасных природных процессов и нарушению динамиче-

ского равновесия, что, в свою очередь, оказывает негативное влияние на трубопровод и приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Все линейные сооружения, проходящие на 70 % территории России, занятых криолитозонами, подвергаются морозному пучению.

В настоящее время существует большое количество разнообразных и в то же время разрозненных методов определения величины и направления деформаций наружной

и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород.

Среди методов определения состояния, а также величины подземной составляющей выделяются такие, как георадиолокации, гравиметрический, методы исследования динамики развития бугров пучения с использованием метеоданных и термометрии.

Многолетнемерзлые породы не всегда удастся выявить при изучении разреза скважин, но метод георадиолокации позволяет определить их в растепленном состоянии.

Особенно удачным оказывается применение георадара при определении контуров многолетнемерзлых пород, не выраженных в рельефе, а также областей с развивающимся термокарстом.

Применение георадара хорошо себя зарекомендовало себя при проведении площадных и линейных изысканий, определении границ многолетнемерзлых пород и при исследованиях донных отложений на реках и озерах.

Среди недостатков применения георадара можно выделить: необходимость получения высокого разрешения радиограмм при наличии тонких слоев грунта, плохую читаемость радиограмм при наличии помех и сложных грунтов над исследуемым объектом, а также высокую стоимость оборудования [1].

К сожалению, этой технологии недостаточно для полноценного контроля многолетнемерзлых пород.

Исследования материалов метеонаблюдений показали, что бугры пучения многолетнемерзлых пород продолжают развиваться, несмотря на общее уменьшение суровости климатических условий, а также изменение количества атмосферных осадков. Вместе с этим материалы, метеонаблюдений не показывают реальной картины величины и направления деформации подземной составляющей бугров пучения [6].

Среди методов, с помощью которых можно определить величину наружной составляющей, выделяются такие методы, как нивелирование, ГНСС-съемка, тахеометрическая съемка, лазерное сканирование, фотограмметрическая аэрофотосъемка БПЛА, спутниковое зондирование [13].

Несмотря на доступность, нивелирование поверхности позволяет получить только высотную составляющую, что явно недостаточно для полноценного геопространственного мониторинга величины и направления деформации бугров и площадей пучения.

Одной из современных технологий для проведения геодезического мониторинга бугров пучения является ГНСС-технология, но и она имеет ряд недостатков, которые ограничивают ее применение [14].

К числу таких недостатков можно отнести падение точности наблюдений из-за сокращения числа спутников, а также неблагоприятного расположения созвездия спутников относительно наблюдателя. Это может происходить из-за возникновения на пути прохождения сигнала различных препятствий. В результате ионосферных возмущений может происходить потеря захвата спутников [15, 16].

Одним из основных минусов лазерного сканирования по сравнению с топографической съемкой тахеометром является съемка «существующей поверхности», не всегда совпадающей с реальной поверхностью рельефа, что особенно важно при проведении измерений в условиях Крайнего Севера.

Аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата осуществляется путем сплошного фотографирования земной поверхности и дальнейшей фотограмметрической обработки массива полученных снимков на основе стереоэффекта перекрывающихся снимков. Однако масштабы крупнее 1 : 2 000 при сложной местности нуждаются в уточнении наземными способами съемки. Одним из самых существенных недостатков аэрофотосъемочных работ является то, что их можно выполнять при благоприятных метеорологических условиях.

### *Результаты*

Несмотря на большое количество разработанных методик и технологических решений для проведения исследований, все они не предполагают совместного использования при проведении геопространственного мониторинга бугров пучения многолетнемерзлых пород. Поэтому важной задачей является раз-

работка методики и технологических решений для геодезического мониторинга наружной и подземной составляющей многолетнемерзлых пород с целью прогнозирования динамики развития или деградации бугров пучения, а также влияния этих процессов на объекты инфраструктуры нефтегазовых месторождений.

В связи с этим разработана методика геопространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформаций наружной и подземной составляющих бугров пучения, в которой различные методы и технологии дополняют друг друга в едином технологическом процессе.

На первом этапе производства работ по геопространственному мониторингу выполняется рекогносцировка бугров пучения с определением типа объекта исследования. Также на этом этапе работ создается опорная геодезическая сеть с использованием ГНСС-приемников, с привязкой к пунктам Государственной геодезической сети. В качестве примера можно привести схему планово-высотного обоснования с замкнутыми полигонами на Самбургском месторождении. Схема сети представлена на рис. 2.

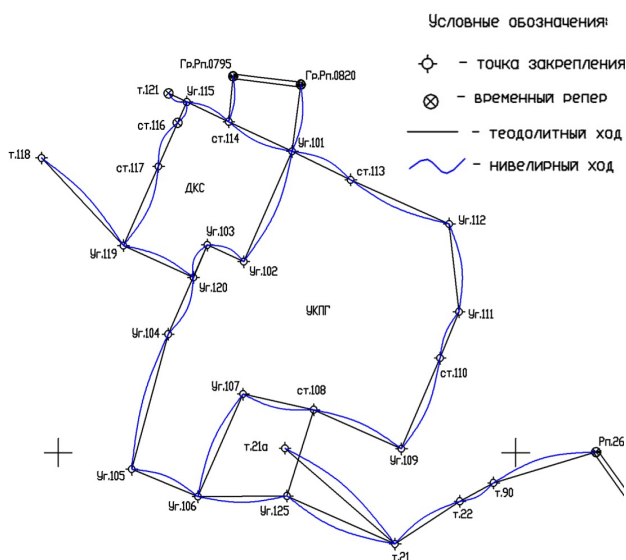


Рис. 2. Схема планово-высотного обоснования

В качестве исходных пунктов могут приниматься постоянно-действующие спутниковые станции, измерения выполняются от них [17].

Значение средней квадратической погрешности (СКП) измерения в плане в каждом сеансе наблюдений рассчитывается по формуле

$$m_s = (m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta y}^2)^{1/2},$$

где  $m_{\Delta x}$  – средняя квадратическая погрешность определения приращения координат по оси  $X$ ;  $m_{\Delta y}$  – средняя квадратическая погрешность приращения координат по оси  $Y$  в конкретном сеансе наблюдений.

Развитие планово-высотного обоснования проводилось от реперов геодинимического полигона с использованием спутниковых приемников. Предельные погрешности положения пунктов планового съемочного обоснования относительно пунктов государственной геодезической сети не превышают 0,3 мм в масштабе плана. Планово-высотное съемочное обоснование создавалось путем проложения отдельных теодолитных ходов с узловыми точками и ходов технического нивелирования. Измерение углов и длин линий в теодолитных ходах выполнено электронным тахеометром с невязкой не более

$$f_{\beta} = \pm 1,5\sqrt{n},$$

где  $n$  – число углов в ходе.

Высотное обоснование создавалось путем проложения нивелирных ходов с невязкой не более

$$f_h = \pm 50\sqrt{L},$$

где  $L$  – длина хода.

На втором, основном, этапе выполняют определение величины и направления деформаций наружной и подземной составляющей бугров пучения многолетнемерзлых пород. Для этого выполняют бурение скважин, расположенных на вершине бугра пучения, подошве бугра пучения, по закрепленным точкам. Георадаром определяют границу подземной составляющей бугра пучения, выполняют бурение в этих точках, бурение выполняют до определения точных границ подземной составляющей бугра пучения, выполняют определение координат  $X, Y, Z$  всех закрепленных точек и пробуренных скважин, опускают в пробурен-

ные скважины термокосу и выполняют измерение температуры, передают полученную цифровую информацию в компьютерную программу, выполняют построение цифровой модели бугра пучения, в этой же программе модель наружного контура бугра пучения совмещают с моделью, построенной по результатам предыдущих измерений наружного контура бугра пучения вечной мерзлоты, в автоматическом режиме определяют величину деформации наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты [18]. Для оптимизации процесса производства измерений воз-

можно применение устройства для транспортировки геодезического, георадарного, геологического оборудования и выполнения геодезических, георадарных и геологических работ, описанного в [18].

На заключительных этапах выполнения работ по геопространственному мониторингу бугров пучения дается прогноз динамики развития бугров пучения ММП, а также определение типа и прогноз деформации линейных сооружений от влияния развития или деградации бугров пучения ММП.

Предлагаемая методика приведена на рис. 3.

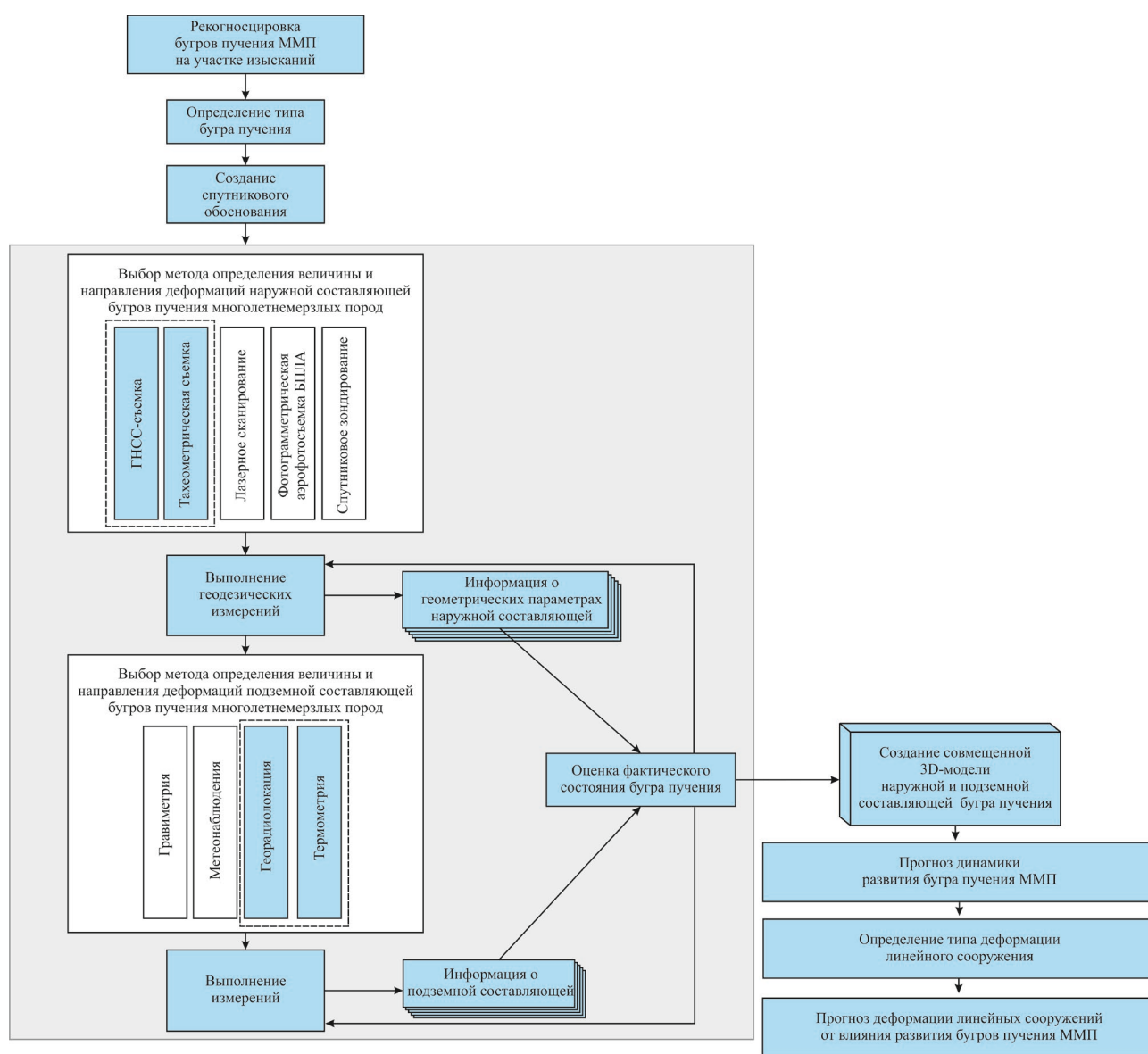


Рис. 3. Методика геопространственного мониторинга бугров пучения на основе способа определения величины и направления деформации наружной и подземной составляющих бугров пучения

### Заклучение

При выполнении инженерных изысканий для обустройства нефтегазовых месторождений особое внимание следует уделять определению границ наземной и подземной составляющих миграционных бугров пучения с яд-

ром из многолетнемерзлых пород. Геопро-  
странственное положение трубопровода и его взаимодействие с влиянием миграционных бугров пучения изучено недостаточно хорошо, но разработанная методика позволяет на этапе инженерных изысканий осуществлять прогнозирование деформационных процессов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биндер И. О, Мурзинцев П. П. Об учете погрешностей геодезического обеспечения при строительстве, мониторинге и предрасчетах деформаций трубопроводов // Геодезия и картография. – 2015. – № 6. – С. 13–16.
2. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю. Н. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. – М. : Изд-во МГУ, 2008. – 571 с.
3. Сукачев В. Н. К вопросу о влиянии мерзлоты на почву // Изв. Академии наук. – 1911. – Сер. 6, Т. 5, № 1. – С. 24–33.
4. Попов А. И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. – Москва : Издательство Академии Наук СССР, 1953. – 230 с.
5. Васильчук Ю. К. Об особенностях формирования бугров пучения на севере Западной Сибири в голоцене. Природные условия Западной Сибири. – М. : Изд-во МГУ, 1983. – С. 88–103.
6. Васильчук Ю. К., Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Чижова Ю. Н. Миграционные бугры пучения на европейском севере России. Южный и северный пределы ареала и современная динамика // Инженерная геология. – 2011. – № 6. – С. 56–72.
7. Москаленко Н. Г., Пономарева О. Е. Изменения растительности и геокриологических условий бугров пучения, нарушенных линейным строительством в северной тайге Западной Сибири // Криосфера Земли. – 2004. – Т. 8, № 2. – С. 10–16.
8. Мурзинцев П. П., Павлов М. М., Репин А. С. Особенности геодезического обеспечения строительства автодороги и пространственного мониторинга на Бованенковском месторождении // Геодезия и картография – 2016. – № 2. – С. 2–5.
9. Карпик А. П. Проблемы геодезического обеспечения мониторинга // Традиции и инновации в начале XXI столетия : сб. материалов межрегиональной междисциплинарной науч. конф. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 13–20.
10. Лисицкий Д. В., Мурзинцев П. П. Геодезический мониторинг территорий // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 116–118.
11. Мурзинцев П. П. Геодезический пространственный мониторинг территорий Западной Сибири // Геодезия и картография. – 2010. – № 7. – С. 45–48.
12. Мурзинцев П. П., Биндер И. О., Репин А. С., Гриднева Б. О. Инженерные изыскания коридоров линейных коммуникаций с учетом геотехнического мониторинга бугров пучения // Геодезия и картография – 2020. – № 10. – С. 7–13.
13. Карпик А. П., Сиякин А. К., Кошелев А. В. Тенденции развития геодезических измерительных систем в двадцать первом веке // Современные проблемы геодезии и оптики : тез. докл. 51 научно-техн. конф. (16–19 апреля 2001 г.). – Новосибирск : СГГА, 2001.
14. Антонович К. М., Карпик А. П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2003. – № 6. – С. 123–135.
15. Карпик А. П. Оценка возможностей мониторинга земель территорий спутниковым методом // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 2/1. – С. 3–6.
16. Карпик А. П., Скрипников В. А., Мурзинцев П. П. Спутниковые измерения – основа формирования пространственного положения объектов // 3-й Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-98) : тез. докл. – Новосибирск : Ин-т математики, 1998. Ч. 3.
17. Патент № 2712796 Российская Федерация, G01C 5/00 (2019.08), G01V 3/12 (2019.08), G01K 13/00 (2019.08), E21B 47/065 (2019.08), E21B 47/122, (2019.08), G01N 33/24 (2019.08). Способ определения величины и направления деформаций наружной составляющей бугров пучения вечной мерзлоты: № 2019113686: заявл. 30.04.2019; опубл. 31.01.2020 / Мурзинцев П. П., Биндер И. О., Репин А. С.; заявитель СГУГиТ. – 9 с: ил.

18. Патент № 164037 Российская Федерация, В62D 63/06 (2006.01), В62В 15/00 (2006.01), G01V 1/00 (2006.01). Устройство для транспортировки геодезического, георадарного, геологического оборудования и выполнения геодезических, георадарных и геологических работ: № 2015115652/02: 24.04.2015: опубл. 20.08.2016 / Биндер И. О., Мурзинцев П. П. – 2 с: ил.

Получено 02.04.2021

© А. С. Репин, 2021

## METHODS OF GEOSPATIAL MONITORING OF PERMAFROST HEAVE MOUNDS

*Alexander S. Repin*

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: vip.repin2010@mail.ru

The article presents historical aspects of the research of permafrost landforms. Technogenic and natural factors affecting the development and degradation of the heaving hills, as well as the impact of the heaving hills on the infrastructure of the oil and gas industry in the Far North during its operation, are considered. The article presents the existing methods for determining the value of the external and underground components of the hummocks of permafrost heaving. The analysis of the existing methods and means of performing measurements in determining the external and underground components of the hummocks of permafrost heaving is carried out. Based on the results of the research and analysis of materials, a method for geospatial monitoring of heave mounds based on a method for determining the magnitude and direction of deformation of the external and underground components of heave mounds are offered.

**Keywords:** geospatial monitoring, permafrost landforms, engineering and geodetic surveys, linear structures, oil and gas fields

## REFERENCES

1. Binder, I. O., & Murzintsev, P. P. (2015). On accounting for errors in geodetic support during construction, monitoring and pre-calculations of pipeline deformations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 6, 13–16 [in Russian].
2. Vasilchuk, Yu. K., Vasilchuk, A. K., Budantseva, N. A., & Chizhova, Yu. N. (2008). *Vypuklye bugry pucheniya mnogoletnemerzlykh torfyanykh massivov [Convex heaving mounds of permafrost peat masses]*. Moscow: Moscow University Publ., 571 p. [in Russian].
3. Sukachev, V. N. (1911). On the question of the influence of permafrost on the soil. *Izvestiya Akademii Nauk [Bulletin of the Academy of Sciences]*, Series 6, 5(1), 24–33 [in Russian].
4. Popov, A. I. (1953). *Vechnaya merzlota v Zapadnoy Sibiri [Permafrost in Western Siberia]*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Publ., 230 p. [in Russian].
5. Vasilchuk, Yu. K. (1983). *Ob osobennostyakh formirovaniya bugrov pucheniya na severe Zapadnoy Sibiri v golotsene. Prirodnye usloviya Zapadnoy Sibiri [On the peculiarities of the formation of heaving mounds in the north of Western Siberia in the Holocene. Natural conditions of Western Siberia]* (pp. 88–103). Moscow: Moscow University Publ. [in Russian].
6. Vasilchuk, Yu. K., Vasilchuk, A. K., Budantseva, N. A., & Chizhova Yu. N. (2011). Migration mounds of heaving in the European north of Russia. Southern and northern limits of the area and modern dynamics. *Inzhenernaya geologiya [Engineering Geology]*, 6, 56–72 [in Russian].
7. Moskalenko, N. G., & Ponomareva, O. E. (2004). Changes in vegetation and geocryological conditions of heaving mounds disturbed by linear construction in the northern taiga of Western Siberia. *Kriosfera Zemli [Cryosphere of the Earth]*, 8(2), 10–16 [in Russian].
8. Murzintsev, P. P., Pavlov, M. M., & Repin, A. S. (2016). Features of geodesic support for road construction and spatial monitoring at the Bovanenkovskoye field. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2, 2–5 [in Russian].

9. Karpik, A. P. (2012). Problems of geodesic support for monitoring territories. In *Sbornik materialov mezhdistsiplinarnoy nauchnoy konferentsii: Traditsii i innovatsii v nachale XXI stoletiya [Proceedings of an Interregional Interdisciplinary Scientific Conference: Traditions and Innovations at the beginning of the XXI century]* (pp. 13–20). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
10. Lisitsky, D. V., & Murzintsev, P. P. (2012). Geodesic monitoring of territories. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 116–118 [in Russian].
11. Murzintsev, P. P. (2010). Geodetic spatial monitoring of Western Siberia territories. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 7, 45–48 [in Russian].
12. Murzintsev, P. P., Binder, I. O., Repin, A. S., & Gridneva, B. O. (2020). Engineering surveys of corridors of linear communications taking into account geotechnical monitoring of heaving mounds. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 10, 7–13 [in Russian].
13. Karpik, A. P., Sinyakin, A. K., & Koshelev, A. V. (2001). Trends in the development of geodesic measurement systems in the twenty-first century. In *Tezisy dokladov 51 nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: Sovremennye problemy geodezii i optiki [Abstracts of 51 Scientific and Technical Conferences: Modern Problems of Geodesy and Optics]*. Novosibirsk: SSGA Publ., 110 p. [in Russian].
14. Antonovich, K. M., & Karpik A. P. (2003). Monitoring of objects with the use of GPS technologies and other methods of determining the position. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 6, 123–135 [in Russian].
15. Karpik, A. P. (2012). Evaluation of the possibilities of monitoring land territories by satellite method. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2/1, 3–6 [in Russian].
16. Karpik, A. P., Skripnikov, V. A., & Murzintsev, P. P. (1998). Satellite measurements - the basis for the formation of the spatial position of objects. In *Tezisy dokladov 3-go Sibirskogo kongressa po prikladnoy i industrialnoy matematiki (INPRIM-98): ch. 3 [Abstracts of the 3rd Siberian Congress on Applied and Industrial Mathematics (INPRIM-98): Part 3]*. Novosibirsk: Institute of Mathematics, 110 p. [in Russian].
17. Murzintsev, P. P., Binder, I. O., & Repin, A. S. (2020). Patent No. 2712796 Russian Federation. Method for determining the magnitude and direction of deformations of the external component of permafrost heave mounds [in Russian].
18. Binder, I. O., & Murzintsev, P. P. (2016). Patent No. 164037 Russian Federation. Device for transporting geodetic, georadar, geological equipment and performing geodetic, georadar and geological works [in Russian].

Received 02.04.2021

© A. S. Repin, 2021