

На правах рукописи



ХОДАКОВ ПАВЕЛ АРКАДЬЕВИЧ

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА  
СТАБИЛЬНОСТЬ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ОСНОВЫ  
В РАЙОНАХ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ  
(на примере территории Якутии)

Специальность 25.00.32 – Геодезия

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре Высшей геодезии

**Научный руководитель:**

**Непоклонен Виктор Борисович,**  
доктор технических наук, с.н.с.

**Официальные оппоненты:**

**Стеблов Григорий Михайлович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН, ФГБУН Институт  
физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
(ИФЗ РАН), Лаборатория спутниковых  
методов изучения геофизических  
процессов, главный научный сотрудник.

**Докукин Петр Александрович,**  
кандидат технических наук,  
Российский университет дружбы народов,  
Аграрно-технологический институт,  
первый заместитель директора -  
заместитель по научной работе,  
инновационной деятельности и развитию.

**Ведущая организация:**

**АО «Роскартография»**

Защита диссертации состоится «1» июня 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии «МИИГАиК» и на сайте:

[http://www.miiгаik.ru/nauka/dissertacionny\\_sovet/dissertatsii/](http://www.miiгаik.ru/nauka/dissertacionny_sovet/dissertatsii/)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 30.12.2015 №431-ФЗ «О геодезии, картографии и пространственных данных...» для обеспечения выполнения геодезических и картографических работ на территории Российской Федерации создаются и используются государственная геодезическая сеть (ГГС), государственная нивелирная сеть и государственная гравиметрическая сеть, в целях, соответственно, установления государственных систем координат, их распространения на территорию Российской Федерации и обеспечения возможности создания геодезических сетей специального назначения, распространения государственной системы высот и государственной гравиметрической системы на территорию Российской Федерации.

Государственная геодезическая (нивелирная, гравиметрическая) сеть представляет собой совокупность геодезических (нивелирных, гравиметрических) пунктов, расположенных на обеспечиваемой территории в соответствии с установленными нормами плотности и закрепленных на местности специальными инженерными конструкциями – центрами, обеспечивающими их сохранность и устойчивость в плане и по высоте в течение длительного времени.

На сегодняшний день стабильность положения центров геодезических пунктов должна обеспечиваться в пределах нормативной точности определения их плановых координат и высот. Невыполнение данного требования исключает возможность эксплуатации геодезических пунктов и приводит к необходимости дорогостоящих повторных измерений и восстановительных работ. Разрушение центров фактически приводит к утрате геодезических пунктов.

В перспективе требования к обеспечению стабильности положения геодезических пунктов будут повышаться. Поэтому обеспечение надежного закрепления геодезических центров, сохранности и неизменности их положения в плане и по высоте в течение длительного времени приобретает большое значение для всей геодезической отрасли страны.

В современных условиях имеются три основных причины, которые вызывают разрушение или потерю стабильности положения геодезических пунктов:

хозяйственная деятельность субъектов; невыполнение требований действующих нормативных документов в отношении обеспечения сохранности пунктов ГГС при выполнении геодезических работ; природные процессы, в том числе процессы, связанные с изменением климата, одним из которых является увеличение глубины протаивания грунтов в зоне многолетней мерзлоты.

Районы многолетней мерзлоты занимают около 65% территории страны. В этих районах геодезические центры и реперы должны закладываться ниже глубины протаивания грунта, причем с определенным запасом прочности. Глобальное потепление климата увеличивает глубину протаивания грунта, в результате чего растет количество случаев нарушения требований инструкции к глубине закладки центров по отношению к нижней границе протаивания. Соответственно, обостряется вопрос о надежности и доверии к стабильности таких сооружений в зоне многолетней мерзлоты. Одним из наиболее крупных российских регионов вообще и регионов, испытывающих на себе влияние многолетней мерзлоты и протекающих в ней процессов, в частности, является территория Республики Саха (Якутия).

**Степень разработанности темы.** Исследования вопросов закрепления пунктов ГГС начали проводиться в нашей стране в середине 1930-х годов в ЦНИИГАиК под руководством С.Г. Пархоменко. В ходе этих исследований было выявлено значительное влияние промерзания и протаивания грунтов на устойчивость знаков. В 1950 году в ЦНИИГАиК под руководством М.С. Успенского были проведены исследования устойчивости геодезических знаков во всех наиболее типичных физико-географических зонах страны, для чего на территории СССР была создана сеть из 14 опытных площадок. Результаты этих исследований не потеряли своего основополагающего значения до настоящего времени. Существенный вклад в развитие практики обеспечения устойчивости и надежности геодезических знаков внесли Б.Г. Богданов, В.В. Гаревский, А.С. Ильин, Л.А. Кашин, В.И. Кафтан, Ю.А. Крюков, Е.Н. Кондратьева, А.Г. Малков, И.Н. Мещерский, И.С. Пандул, В.Д. Сибирцев, Х.К. Ямбаев, С.Г. Барабанщиков и др. Вопросы закрепления геодезических центров в многолетней мерзлоте нашли отражение в работах Б.Г. Богданова и Е.Н. Кондратьевой. Однако эти работы относятся к периоду

относительной стабильности многолетней мерзлоты. Кроме того, во всех указанных работах, датируемых серединой и концом прошлого века и ориентированных, соответственно, на традиционные геодезические измерения, не затронуты вопросы закрепления в условиях многолетней мерзлоты спутниковых геодезических построений. Следует отметить, что и в последующие годы этим вопросам, имеющим существенное значение с точки зрения современной геодезической практики, в отечественных и зарубежных публикациях не уделялось должного внимания.

С учетом отмеченных обстоятельств, а также большого количества геодезических центров и реперов, заложенных на территории Российской Федерации в районах многолетней мерзлоты, и в связи с намеченными перспективами развития в этих районах спутниковых геодезических сетей тема настоящего диссертационного исследования **актуальна** для развития отрасли геодезии и картографии и системы топографо-геодезического обеспечения Российской Федерации.

**Целью диссертационной** работы является повышение эффективности работ по поддержанию в рабочем состоянии и созданию исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты (в условиях глобальных изменений климата).

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные **задачи**:

1. Провести анализ характеристик и современного состояния государственных геодезических и нивелирных сетей по типам центров, используемых для их закрепления на местности.
2. Уточнить требования к учету глубин сезонного протаивания грунта при аттестации существующих и создании новых геодезических пунктов в районах многолетней мерзлоты.
3. Разработать методику оценки глубин протаивания грунта и их изменений на территории Якутии, включающую моделирование глубин протаивания с использованием современных геоинформационных технологий.
4. Разработать методику учета влияния эрозионных изменений берегов арктических морей при оценке состояния существующих и планировании закладки новых геодезических пунктов.

5. Разработать предложения по практическому использованию указанных методик для учета влияния глобальных изменений климата, выражающегося в увеличении глубины протаивания грунта на территории Якутии и повышении интенсивности эрозионных процессов в прибрежных районах арктических морей, на стабильность геодезической основы в районах многолетней мерзлоты.
6. Разработать с использованием современных данных обновленную электронную карту глубин протаивания грунта на территории Якутии, предложения по ее размещению в сети Интернет и рекомендации по практическому использованию при оценке глубин заложения центров геодезических пунктов.
7. Разработать схему поправок в геодезические высоты за переход к нормальным высотам для поддержания системы высот и реализации метода спутникового нивелирования на территории Якутии и Российской Федерации в целом в условиях возможной утраты части пунктов Главной высотной основы (ГВО) под влиянием деградации многолетней мерзлоты.
8. Провести экспериментальные исследования по проверке теоретических положений и моделей, положенных в основу разрабатываемых методик.

Перечисленные задачи решались с использованием **методов** высшей геодезии, геодезической гравиметрии, математического и геоинформационного моделирования, статистического анализа и современных информационных технологий.

**Научная новизна исследований** заключается в постановке комплекса задач учета глобальных изменений климата на состояние геодезической основы районов многолетней мерзлоты, которые ранее не рассматривались в геодезических исследованиях, использовании для оценки реакции многолетней мерзлоты на изменение климата новых данных, полученных с сети станций Росгидромета и сети геокриологического мониторинга CALM, разработке и исследовании математических моделей для оценки сезонного протаивания грунта с использованием методов интерполяции, обеспечивающих получение приемлемой точности прогноза максимальных глубин в условиях относительно редкой сети станций наблюдения.

**На защиту выносятся** новые научные **положения** и результаты:

1. Обоснование необходимости учета последствий глобального изменения климата Земли, выражающихся в увеличении глубин сезонного протаивания грунта в районах многолетней мерзлоты и интенсификации эрозионных процессов в

прибрежной зоне арктических морей, при поддержании, развитии и модернизации государственных геодезических и нивелирных сетей.

2. Выполнено площадное моделирование поля глубин протаивания грунта на территории Якутии с использованием геоинформационных технологий, обеспечивающее адекватное отражение текущего состояния многолетней мерзлоты на данной территории в цифровом и графическом виде по имеющимся фактическим данным станций наблюдения и позволяющее проследить динамику изменения глубин протаивания грунта под влиянием глобальных изменений климата Земли.

3. Методика учета влияния глобальных изменений климата, выражающегося в увеличении глубины протаивания грунта на территории Якутии и интенсивности эрозионных процессов в прибрежных районах арктических морей, на стабильность геодезической основы в районах многолетней мерзлоты, позволяющая повысить объективность оценки состояния ГГС, надежность исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты, уменьшить риски снижения качества и повышения трудоемкости выполнения работ по поддержанию и развитию геодезических сетей в сложных физико-географических условиях.

4. Технологии построения и экспериментальные образцы обновленной электронной карты глубин протаивания грунта на территории Якутии, созданной с использованием современных данных, и схемы поправок за переход от геодезических высот к нормальным высотам, обеспечивающие повышение достоверности оценки необходимых глубин закладки геодезических центров в условиях деградации многолетней мерзлоты и использование спутниковых методов развития высотной основы.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственном участии в проведении всех теоретических и экспериментальных исследований, апробации результатов исследования, подготовке докладов и публикаций по теме диссертации. Вся обработка и интерпретация полученных результатов выполнена лично автором.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в разработке теоретических основ и математического обеспечения повышения точности и надежности учета глубин протаивания грунта по данным наблюдений при

поддержании в рабочем состоянии и развитии исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты.

**Практическая значимость** диссертации заключается в разработке методик, вспомогательных средств и рекомендаций, позволяющих повысить объективность, достоверность и актуальность данных о необходимых глубинах закладки геодезических центров на территории Якутии и, как следствие, повысить эффективность работ по аттестации геодезических пунктов, поддержанию и развитию ГГС в условиях многолетней мерзлоты. Реализация предлагаемых в работе технологических и технических решений, в том числе, созданной автором современной по содержанию и форме карты протаивания Якутии для расчета глубины закладки геодезических центров, позволит оперативно определять необходимую глубину закладки контрольных центров ФАГС и ВГС, геодезических центров при развитии спутниковых геодезических сетей, и сетей нивелирования I и II классов, а также своевременно исключать из работ геодезические пункты, центры которых находятся в аварийном состоянии.

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность результатов проведенных исследований определяется корректностью постановки задач, предлагаемых путей и методов их решения, строгостью математического аппарата обработки результатов наблюдений, использованием реальных данных о глубинах протаивания в районах многолетней мерзлоты, обработкой и анализом измерительной информации с помощью апробированного программного обеспечения ведущих мировых производителей.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на двух научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, на заседаниях кафедры Высшей геодезии, семинарах в ЦНИИГАиК и ФБГУ Центра геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации автором опубликованы девять статей. Все журналы, в которых опубликованы статьи, входят в перечень изданий, рекомендованных ВАК.



**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованной литературы и девяти приложений. Диссертация изложена на 148 страницах. Список использованной литературы включает 108 наименований, в том числе, 34 на английском языке. Диссертация сопровождается 46 иллюстрациями, 9 таблицами и 9 приложениями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность темы и основные направления исследований, сформулирована цель работы и ее научная новизна.

**В первом разделе** «Общий анализ состояния ГГС» рассмотрено современное состояние государственных геодезических сетей в контексте проблем утраты геодезических центров и реперов, а также государственной инвентаризации геодезических пунктов. Проведенный анализ имеющихся сведений об утрате геодезических центров и реперов показал, что центры высотных сетей утрачивается в два раза чаще, чем центры плановых сетей. На основании проведенного анализа были выработаны предложения по снижению утраты геодезических центров спутниковых сетей. Даны предложения по государственной инвентаризации и регистрации геодезических пунктов. Выполнен сравнительный анализ типов центров и реперов ГГС. Самыми распространенными типами центров в ГГС 1, 2, 3 и 4-х классов являются типы 1, 2, 12 и 146. Основная часть пунктов расположена в высотном диапазоне до 500 метров (67% от общего количества центров ГГС всех классов). Выше 500-метровой отметки начинают преобладать скальные типы центров (99, 95). Линии нивелирования I класса закреплены 97 546 реперами. Более 68% реперов линий нивелирования I класса расположены ниже трехсотметровой отметки. Самыми распространенными являются типы 1 и 10. Их заложено более пяти тысяч каждого типа. Линии нивелирования II класса закреплены 124 915 реперами. Более 72% расположены ниже трехсотметровой отметки. Наиболее распространёнными являются центры типа 160 (23 161). Проведен анализ интенсивности закладки центров различных типов, с привязкой к году заложения и к месту закладки.

**Во втором разделе** «Разработка и исследование методик для оценки влияния процессов, обусловленных глобальными изменениями климата, на состояние геодезической основы в многолетней мерзлоте» разработана методика учета глобальных изменений климата на стабильность геодезической основы в районах многолетней мерзлоты, состоящей из двух основных частей, а именно, двух частных методик оценки влияния процессов, обусловленных указанными изменениями – методики оценки глубины протаивания грунта и ее изменения для расчета глубины закладки геодезических центров и методики учета влияния эрозионных изменений берегов арктических морей на состояние и планируемое развитие геодезических сетей в районах многолетней мерзлоты.

Методика оценки глубины протаивания грунта и ее изменений заключается в следующем:

1. Построение современной карты глубин протаивания грунтов по данным наблюдений с использованием различных методов площадной интерполяции (линейная интерполяция, кригинг и др.). Выбор оптимального варианта по точностным характеристикам путем проведения сравнительных исследований. Рекомендации: при недостаточном количестве исходных данных на краях исследуемой области в качестве исходных данных, обеспечивающих устойчивость процедуры интерполяции, могут использоваться значения глубин, предварительно рассчитанные по формулам линейной экстраполяции; для удобства дальнейшего использования построенная карта размещается в открытом доступе в сети Интернет; периодичность обновления карты с учетом развития процессов глобального потепления - не реже одного раза в год.
2. Построение карты изменений глубин протаивания как расхождений между построенной согласно п.1 современной картой глубин протаивания грунтов и официальной «Картой промерзания и протаивания грунтов для определения глубины закладки центров и реперов 1987 года».
3. Наложение в пакете ГИС двух карт «Карты разностей» и «Карты промерзания и протаивания грунтов для определения глубины закладки центров и реперов 1987 года» для определения величины увеличившейся глубины протаивания.

4. Загрузка данных о расположении центров и реперов на два слоя карт, которые получены в пункте 3. Если центр попадает в прибрежную зону арктических морей, то необходим учет эрозии берегов.
5. Определение глубины заложенных центров и реперов согласно инструкциям, и глубины современного протаивания. Сравнение двух глубин. Если глубина современного протаивания превышает или равна глубине закладки центра, то репер считается находящимся в аварийном состоянии.
6. Занесение аварийных геодезических центров и реперов в специальную базу данных (либо пометка в соответствующем поле уже существующей базы геодезических данных) и отображение аварийных и стабильных геодезических центров в ГИС (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Окончательный анализ полученной картины результатов аттестации геодезических центров и реперов. Публикация результатов аттестации в Интернет.

Разработанная методика (блок-схема) учета влияния эрозионных изменений берегов арктических морей на состояние и планируемое развитие геодезических сетей в районах многолетней мерзлоты приведена (Рисунок 1).



Рисунок 1 - Блок – схема методики учета влияния эрозионных изменений берегов арктических морей на геодезическую основу

В разделе описано создание современной карты глубин сезонного протаивания грунтов на территории Якутии для расчета глубины закладки геодезических центров (Рисунок 2). Для ее построения были взяты данные международной сети геокриологического мониторинга CALM и данные

метеостанций Росгидромет за период 2006 - 2010 годов с 38 станции на территории Якутии. Особенностью новой карты является то, что она построена по максимальным значениям глубин, в отличие от геокриологических карт глубин протаивания, на которых отражаются средние значения глубин за определенный промежуток времени. Имеются отличия новой карты и от аналогичных карт, созданных в прежние годы, вследствие того, что новая карта построена с привлечением данных международной службы CALM. Кроме этого, карта отражает современные фактические данные о максимальных глубинах протаивания, а не данные, которые рассчитывается с использованием определенной математической модели.

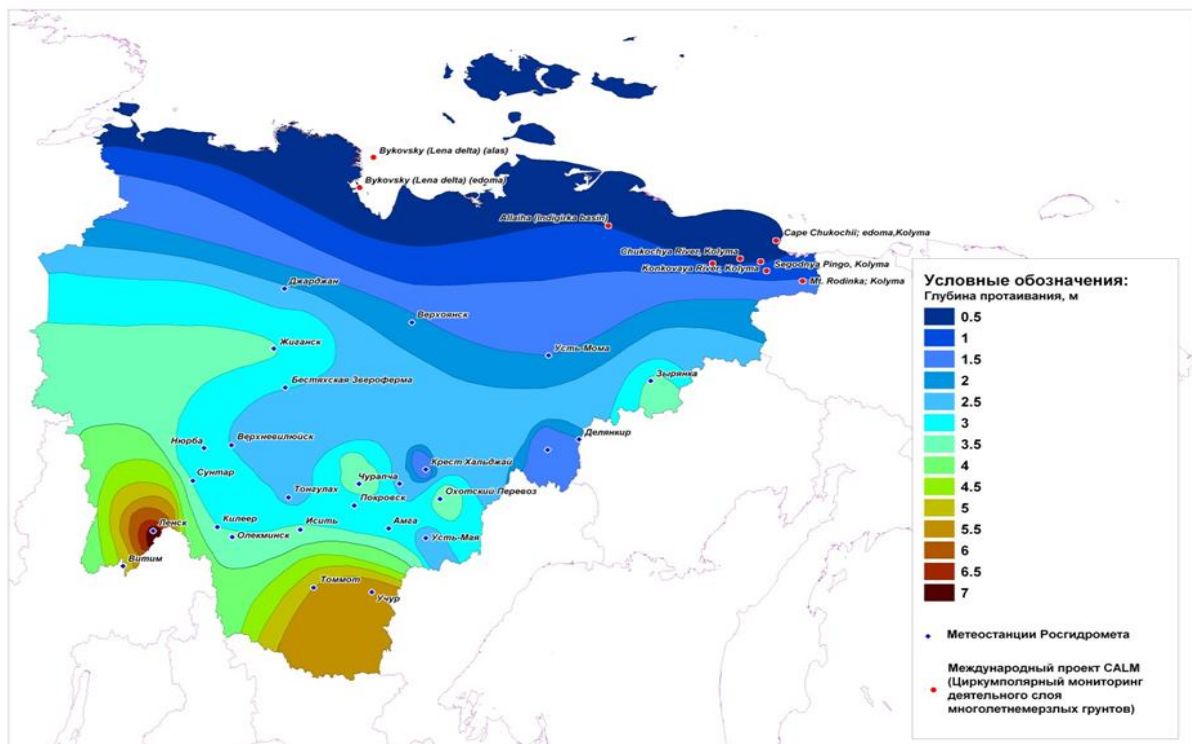


Рисунок 2 - Карта протаивания грунта Якутии для расчета глубины закладки геодезических центров (по новым данным)

Произведено сравнение новой карты с тремя подобными картами, две из которых составлены и адаптированы для геодезического производства, а третья представляет собой современную версию обзорной карты протаивания зоны многолетней мерзлоты, помещенную в Национальный атлас России (2004 — 2008 гг.). Сравнение показало, что значения глубин, представленные на новой карте, во всех случаях превышают те же значения глубин, представленные на других картах. Сопоставление с картой промерзания и протаивания грунтов 1989 года, помещенной

во все инструкции и наставления по производству геодезических и гравиметрических работ показало существенное увеличение максимальной глубины протаивания. На севере глубина протаивания увеличилась примерно на 0,5 метра, в средней части - на 1 – 2 метра. На юге Якутии величина современной глубины протаивания примерно на 3 – 3,5 метра превышает глубины протаивания, определенные по карте 1987 года.

В ходе создания новой карты проведено экспериментальное сравнение различных методов интерполяции исходных данных для выбора наиболее подходящего метода в условиях реально существующей на сегодняшний день относительно редкой сети станций наблюдения на территории Якутии. На основании результатов проведенного исследования в качестве такого метода интерполяции выбран метод кригинга. Карта сезонного протаивания грунта на территории Якутии, построенная с помощью данного метода, представлена на рисунке 3.

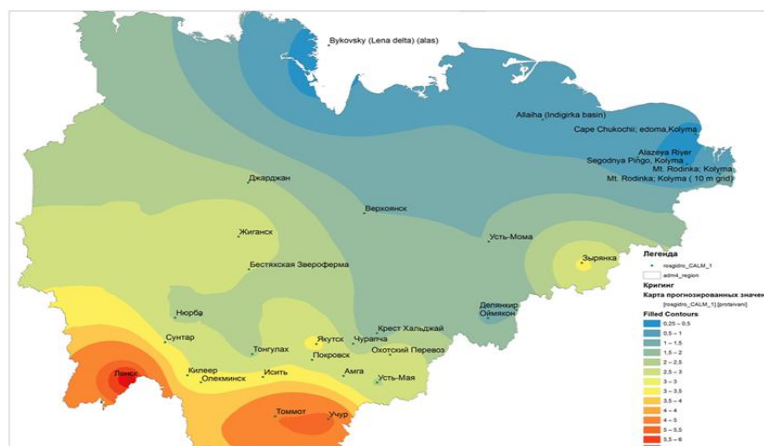


Рисунок 3- Карта протаивания грунта Якутии для расчета глубины закладки геодезических центров, построенная методом кригинга

В процессе практической реализации метода кригинга проведен анализ рекомендаций по выбору формы и параметров соответствующей интерполяционной конструкции, по результатам которого с учетом специфики решаемой задачи в качестве предпочтительных определены настройки, реализующие простейший вариант данного метода. В данном варианте оценка по методу кригинга значения пространственной переменной  $Z$  в некоторой точке, где не было измерений, определяется как:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i, \quad (1)$$

где  $n$  - число исходных измерений;  $\lambda_i$  – веса исходных данных, определяемые из решения системы уравнений кригинга:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i C_{ij} = C_{0j} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (2)$$

В этих уравнениях  $C_{ij} = C((X_i, Y_i); (X_j, Y_j))$  - значение функции ковариации, характеризующие связь между случайными величинами  $Z(X_i, Y_i)$  и  $Z(X_j, Y_j)$  в  $i$  – й и  $j$  –й точках выборки, а  $C_{0j} = C((X_0, Y_0); (X_i, Y_i))$  - значение функции ковариации между случайной величиной  $Z(X_0, Y_0)$  в интерполируемой точке и случайной величиной  $Z(X_i, Y_i)$  в  $i$  – ой точке выборки.

Погрешность оценки метода кригинга характеризуется дисперсией:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \text{Var} \{ Z(X_0, Y_0) / Z_1, \dots, Z_n \} = E[(\hat{Z}_0 - Z(X_0, Y_0))^2] = \\ &= C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{0i} \end{aligned} \quad (3)$$

На основании проведенных исследований предложен следующий общий порядок проведения площадного моделирования поля глубин протаивания грунта на территории Якутии с использованием современных геоинформационных технологий:

1. Сбор информации данных глубин протаивания на территорию Якутии из отечественных и зарубежных источников.
2. Интерполирование глубин протаивания в ГИС различными методами интерполяции.
3. Сравнение этих методов и на основе анализа выбор наиболее подходящего метода интерполяции для исследуемой территории.
4. Построение предварительной цифровой модели глубин путем интерполирования глубин на всей заданной территории выбранным методом.
5. При наличии районов, не обеспеченных исходной информацией (как правило, это районы на границах исследуемой области) - подготовка дополнительной

исходной информации на эти районы по нескольким опорным пунктам путем линейной экстраполяции исходных данных.

б. Построение окончательного варианта цифровой модели глубин с учетом дополнительных пунктов.

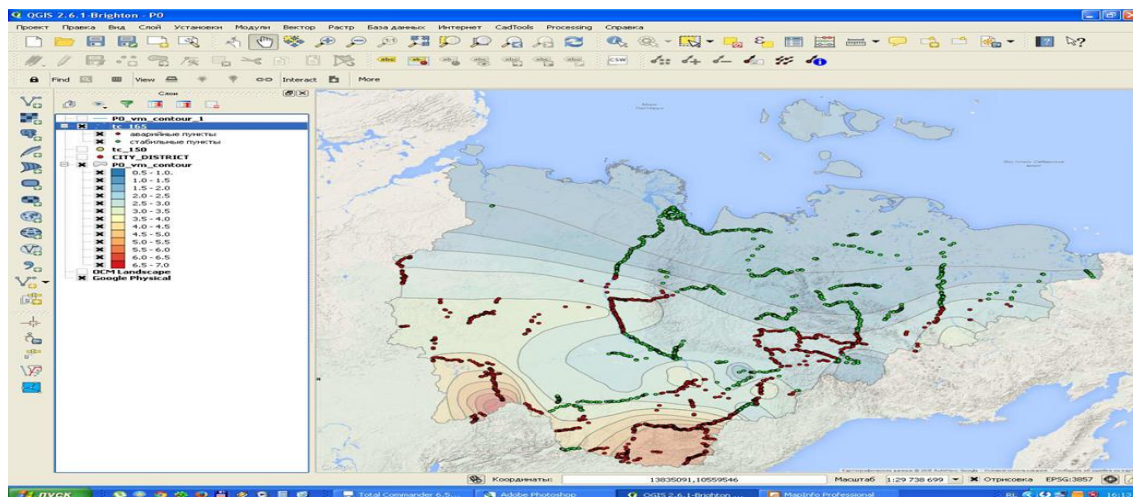


Рисунок 4- Карта современного протаивания грунта Якутии с нанесенными типами центров 165 (зеленым цветом выделены стабильные центры, красным - аварийные)

В рамках разработки методики учета влияния эрозионных изменений берегов арктических морей на состояние и планируемое развитие геодезических сетей в районах многолетней мерзлоты выполнено исследование наличия геодезических центров и реперов в прибрежной десятикилометровой зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря по данным базы гравиметрических, нивелирных и спутниковых данных, непосредственного обследования береговой линии и др. Данное исследование обусловлено тем, что в современных условиях разрушениям и утрате подвержены не только геодезические центры, расположенные в зонах хозяйственной деятельности человека, но и центры, находящиеся в зонах действия разрушительных природных явлений, в частности, интенсивной эрозии берегов арктических морей. Исследование показало, что всего в десятикилометровой прибрежной зоне обоих морей заложено 1845 центров и реперов. Из них центров ГГС 1-4 классов – 1387, реперов Главной высотной основы - 458. Для прибрежной зоны моря Лаптевых из имеющихся 139 реперов определен год закладки 127 реперов, в том числе 56 реперов, заложенных в период 1956-1979 гг, и 71 репера, заложенного в период 1980-1987 гг. Для прибрежной зоны

Восточно-Сибирского моря из 319 расположенных в ней реперов определен год закладки 237 реперов, в том числе 67 реперов, заложенных в период 1939-1969 гг. и 170 реперов, заложенных в период 1971-1988 гг. Приведенные данные свидетельствуют о том, что значительная часть пунктов, формирующих геодезическую основу на территории Якутии, находится в зоне риска не только потери устойчивости вследствие из-за увеличения глубины протаивания, но и разрушения вследствие эрозии береговой линии арктических морей. Относительно надежными можно считать пункты, закрепленные центрами скальных типов. В прибрежной зоне моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря таких пунктов на сегодняшний день выявлено 94. Этого недостаточно для береговой линии протяженностью 1500 км. Тем не менее, эти центры могут использоваться в качестве основы для развития спутниковых геодезических сетей в прибрежной зоне арктических морей, а также для контроля гравиметрических высот квазигеоида по разностям геодезических и нормальных высот и поддержания государственной системы высот в труднодоступных районах Крайнего Севера.

**В третьем разделе «Определение глубины закладки геодезических центров в районах многолетней мерзлоты»** по разработанной методике проведена экспериментальная проверка современного состояния расположенных на территории Якутии реперов, которые закреплены центрами наиболее распространенных в данном регионе типов (150 и 165). По результатам проверки выявлено, что 3,4% реперов типа 150 и 55,2% реперов типа 165 могут быть аттестованы как пункты, находящиеся в аварийном состоянии. Как следствие, эти пункты подлежат выводу из дальнейшей эксплуатации. Это обстоятельство должно учитываться при проектировании расположения вновь создаваемых пунктов спутниковых геодезических сетей на базе существующих центров типа 150 и 165, а также при проектировании контрольных центров ФАГС и ВГС.

Для повышения эффективности использования современных данных о глубинах сезонного протаивания грунта на территории Якутия для определения глубины закладки геодезических центров и реперов предложено эти данные в виде электронной карты, а также сервисы на их основе размещать на тематическом сайте в сети Интернет с обеспечением возможности открытого доступа к этим данным для



удаленных пользователей. Разработан макет реализации подобного сайта, ориентированный на решение двух основных задач – научной и практической. Научная задача состоит в оценке влияния глобального потепления на состояние исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты. Практическая задача предусматривает выявление геодезических пунктов, пришедших в аварийное состояние в результате того, что глубина протаивания превысила глубину закладки центра и анализ динамики изменения аварийности геодезических пунктов вследствие увеличения глубины протаивания.

Создана карта разностей гравиметрических и геометрических аномалий высот (Рисунок 5) для приведения региональной системы нормальных высот к единой общеземной. Отмечено, что в условиях деградации многолетней мерзлоты, эрозии берегов северных морей и для такой огромной территории как Якутия, с учетом разреженности сети геодезических пунктов, одной из первостепенных задач является сохранение стабильности и распространение на неосвоенные территории государственной системы нормальных высот. В качестве инструмента, способствующего решению этой задачи, создана карта разностей высот квазигеоида, полученных известным гравиметрическим методом, и так называемых геометрических высот квазигеоида, полученных как разности геодезических и нивелирных (нормальных) высот одноименных пунктов (Рисунок 5).

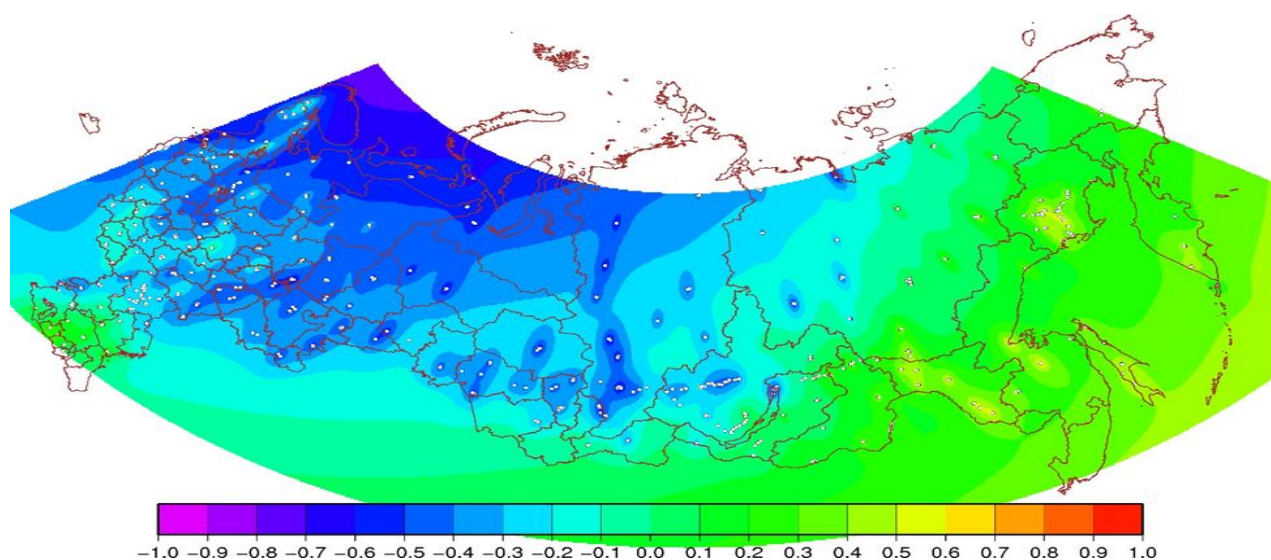


Рисунок 5 - Схема разностей гравиметрических и геометрических высот квазигеоида на территорию России

На примере Якутии показано, что для территорий, находящихся в зонах многолетней мерзлоты должны быть выработаны требования к размещению пунктов спутниковых ГГС на скальных центрах, а также сохранения и выполнения других геодезических и гравиметрических измерений. Разработана схема расположения вновь создаваемых постоянно действующих пунктов спутниковых геодезических сетей на побережье северных морей.

Выполнены исследования по выявлению геодезических центров, заложенных в зоне многолетней мерзлоты, и исследования по расположению геодезических пунктов, закрепленных скальными центрами в зоне многолетней мерзлоты. Всего в многолетней мерзлоте было заложено 101 591 центр ГГС 1-4 класса, из которых 53 844 пункта закреплены скальными центрами. Пунктов ГВО, находящихся в зоне многолетней мерзлоты насчитывается 40 411, из них закрепленных скальными центрами – 7 270 (Рисунок 6).

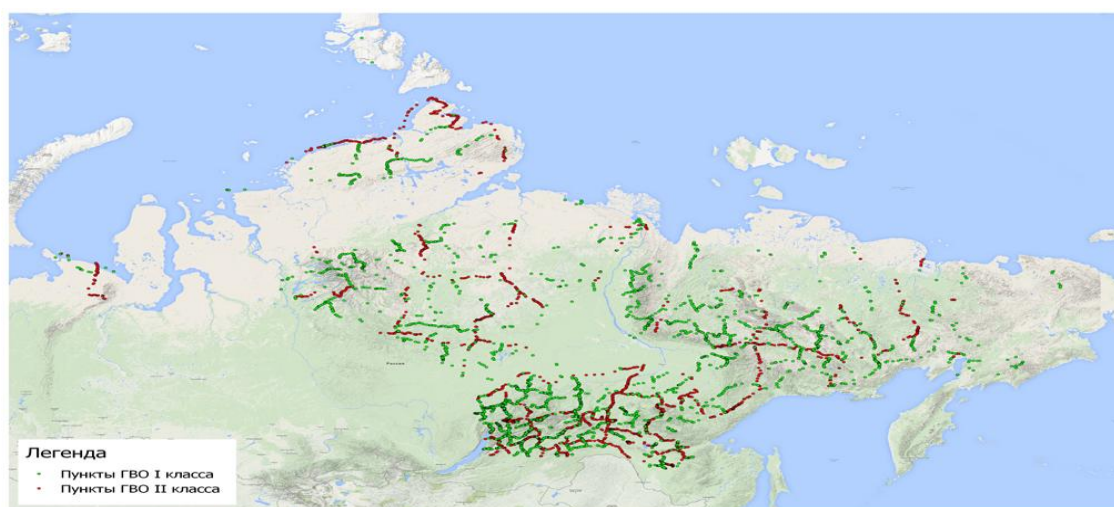


Рисунок 6 - Скальные типы центров нивелирования I и II класса

Были проанализированы типы центров, которыми закрепляют геодезические сети в многолетней мерзлоте, согласно действующим инструкциям. Всего таких типов 16. Из них отобраны те, конструкция которых относительно устойчива к изменениям глубины протаивания. Проведенные исследования показали, что на территории Якутии за последние 20 лет глубина протаивания увеличилась значительно, в среднем на 1 м. Следовательно, центры, глубина закладки которых не превышает современную глубину протаивания грунта с достаточным запасом

прочности (2 м, а в отдельных районах – 3 и более метров), не могут считаться надежными. Разнотипные центры заметно различаются по нормативной глубине закладки. Так, центры типа 150 закладывались на глубину 2-3 метра ниже протаивания грунта. Центры типа 10 закладывались на 2 метра ниже глубины протаивания. Глубина закладки центров типов 107, 108 и 109 должна превышать глубину протаивания на 1, 5 метра. Центры всех остальных типов закладывались на 1 метр ниже глубины протаивания. Таким образом, из имеющихся на сегодняшний день пунктов исходной геодезической основы на территории Якутии только пункты, закрепленные центрами двух типов - 150 и 10 (около 24 тыс.), могут считаться относительно пригодными к эксплуатации. Вместе с этим значительное распространение на территории Якутии имеют пункты, закрепленные центрами типа 165 (8720 пунктов ГГС и ГВО), глубина закладки оснований которых всего на 1 метр превышала номинальную глубину протаивания (на момент закладки). Проведенные исследования показали, что в связи с существенным увеличением фактической глубины протаивания устойчивость этих пунктов на сегодняшний день вызывает сомнения. В связи с этим, а также принимая во внимание, что глубина протаивания в ближайшие десятилетия по прогнозам специалистов продолжит увеличиваться, необходимо в оперативно приемлемые сроки решить вопрос о целесообразности дальнейшей эксплуатации указанных пунктов.

Из проведенного анализа следует, что угроза, вызванная увеличением глубины протаивания, заставляет рассматривать в качестве надежных пунктов для размещения и совмещения пунктов ГГС и ГВО с пунктами спутниковых геодезических сетей типы центров 150, 10 а также все скальные типы, которые не подвержены влиянию деградации многолетней мерзлоты. Наиболее устойчивыми являются пункты с центрами скальных типов. Как следствие, наличие таких пунктов следует рассматривать как важное условие обеспечения стабильности всей исходной геодезической основы на территории Якутии. Представление о плотности и расположении указанных пунктов дает построенная автором схема, приведенная на рисунке 8. Данная схема показывает, что пункты ГВО с центрами скальных типов в целом достаточно равномерно расположены в границах зоны многолетней

мерзлоты, включая побережье северных морей. Предложенная схема контроля устойчивости скальных центров обеспечивает повышение надежности геодезических построений в районах многолетней мерзлоты, в том числе вновь создаваемых спутниковых геодезических сетей.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Итогом** проведенных исследований, целью которых было повышение эффективности работ по поддержанию в рабочем состоянии и созданию исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты (в условиях глобальных изменений климата), стало решение основных задач диссертации, указанных во введении. На основании полученных результатов сделаны следующие **выводы**:

**1.** Государственная геодезическая сеть Российской Федерации на сегодняшний день характеризуется значительным количеством утраченных или находящихся в критическом состоянии геодезических пунктов. Обеспечение надежности геодезических построений требует своевременного вывода из эксплуатации геодезических центров и реперов, находящихся в аварийном состоянии и своевременного усиления конструкции центров, находящихся в критическом состоянии, а также выбора безопасных типов и мест размещения для вновь создаваемых геодезических пунктов.

**2.** В число факторов, влияющих на устойчивость сооружений и конструкций, используемых для закрепления на местности пунктов государственных геодезических, нивелирных и гравиметрических сетей, входят последствия глобального изменения климата Земли, такие как увеличение глубины сезонного протаивания грунта в зоне многолетней мерзлоты и эрозия береговой линии арктических морей. Одним из наиболее крупных регионов России, подверженных влиянию указанных природных факторов, является Республика Саха (Якутия). За последние 20 лет глубина сезонного протаивания грунта на данной территории увеличилась в среднем на 1 метр. Вследствие этого значительная часть из расположенных на территории Якутии 39022 пунктов ГГС и 14485 пунктов ГВО, в настоящее время находится в аварийном состоянии, в том числе пунктов с центрами типов 150 и 165 (более 1/3 пунктов ГВО Якутии) – соответственно 141 (3,4%) и 1018 (52,2%).

**3.** Разработанная методика оценки глубин протаивания обеспечивает возможность проведения периодической актуализации сведений о фактических глубинах сезонного протаивания грунта и скорости их изменения на территории Якутии. Эффективность методики обуславливается построением цифровой модели глубин протаивания по данным станций наблюдения за многолетней мерзлотой на обследуемой территории. Сравнение новой модели с данными о глубинах протаивания предшествующего периода времени характеризует интенсивность процесса деградации многолетней мерзлоты. Экспериментально установлено, что данная методика может быть реализована с использованием современных ГИС, в частности, ГИС ArcInfo.

**4.** При относительно редкой для настоящего времени сети станций наблюдения за многолетней мерзлотой на территории Якутии, насчитывающей 38 станций, моделирование поля глубин протаивания с использованием линейной интерполяции, как это делалось в прежние годы, сопряжено с риском получения недостаточно достоверных и надежных результатов. Его уменьшение достигается предусмотренным в рамках разработанной методики выбором наиболее подходящего метода интерполяции данных наблюдений в узлы равномерной сетки меридианов и параллелей в зависимости от конкретных условий. Результаты проведенного экспериментального исследования различных методов интерполяции в среде ГИС ArcInfo позволяют считать наиболее предпочтительной для территории Якутии интерполяцию данных наблюдений за глубинами сезонного протаивания грунта по методу кригинга.

**5.** Созданная на базе разработанной методики новая электронная карта глубин протаивания грунта обеспечивает возможность проведения аттестации существующих геодезических пунктов и реперов на территории Якутии в разрезе надежности их закрепления соответствующими центрами, а также проведения исследований по выбору наиболее подходящих мест размещения и типов центров для проектируемых геодезических пунктов, в том числе пунктов спутниковых геодезических сетей. В рамках предложенной методики учета влияния глобальных изменений климата эти задачи решаются путем сопоставления нормативной глубины закладки центра с

расчетной глубиной протаивания грунта в данном пункте, полученной по обновленной карте глубин протаивания. Только если нормативная глубина закладки превышает установленный допуск, а именно, расчетную глубину протаивания в сумме с необходимым запасом прочности, в зависимости от типа центра, то существующий геодезический пункт считается пригодным для дальнейшей эксплуатации, а планируемый – для включения в проект развития геодезической сети.

**6.** При учете влияния глобальных изменений климата целесообразно иметь в виду следующие методические приемы, предложенные в качестве дополнительных мер по повышению надежности геодезических построений в условиях деградации многолетней мерзлоты: стабилизация особо важных центров, в частности контрольных центров ФАГС и ВГС, с помощью специальных устройств – термостабилизаторов; преимущественное использование при развитии геодезических сетей исходных пунктов с центрами скальных типов и закрепление вновь создаваемых геодезических пунктов центрами скальных типов; размещение вновь создаваемых геодезических пунктов на достаточном удалении (не менее 10 км) от побережий арктических морей; периодический контроль положения центров, находящихся в зоне многолетней мерзлоты (для центров скальных типов – относительно нескольких опорных пунктов, находящихся вне зоны многолетней мерзлоты; для центров других типов – относительно действующих пунктов с центрами скальных типов).

**7.** Для обеспечения своевременности доведения актуальной и достоверной информации о глубинах сезонного протаивания грунта на территории Якутии и в других районах многолетней мерзлоты до потребителей в удобной форме целесообразно размещение электронной карты сезонного протаивания грунта в сети Интернет на специальном сайте в режиме свободного доступа. При этом могут оперативно решаться следующие научные задачи: оценка скорости и прогнозирование изменения максимальной глубины протаивания грунта в конкретном районе; анализ закономерностей и особенностей пространственного распределения глубин протаивания грунта на исследуемой территории; районирование территории с учетом глубин протаивания грунта; оценка общих тенденций влияния глобального потепления на состояние исходной геодезической

основы в районах многолетней мерзлоты. Возможность реализации этих задач подтверждена разработанным макетом сайта и результатами его опытной эксплуатации в среде ГИС – программы QGIS.

**8.** Распространение системы высот в районах многолетней мерзлоты, не обеспеченных достаточным количеством надежных реперов I – II классов, в том числе из-за утраты их центров вследствие увеличения глубины протаивания, расширяет сферу возможного применения метода спутникового нивелирования как метода, позволяющего уменьшить объемы трудоемких работ по геометрическому нивелированию в сложных условиях. Эффективность реализации спутникового нивелирования в районах многолетней мерзлоты и других районах России обеспечивает новая, более достоверная и подробная, схема распределения поправок в геодезические высоты за переход к нормальным высотам, созданная путем согласования модели гравиметрического квазигеоида на территории страны с высотами квазигеоида, полученными геометрическим путем в пунктах спутниковых геодезических сетей.

На основании результатов диссертационного исследования **рекомендуется:**

- внесение в нормативные документы изменений, касающихся увеличения глубины закладки геодезических центров в районах многолетней мерзлоты;
- размещение узловых и исходных точек на скальных типах центров;
- изменение технологии создания карт глубин протаивания с использованием автоматизации и применением современных методов интерполяции;
- совершенствование порядка доведения информации о глубинах протаивания в виде электронных карт до пользователя с помощью сети Интернет.

Разработанная методика учета влияния глобальных изменений климата на стабильность исходной геодезической основы в районах многолетней мерзлоты в силу ее универсальности может использоваться не только на территории Якутии, но и в других районах Российской Федерации со сходными природно- климатическими условиями.

Возможные **перспективы** дальнейших исследований и разработок по теме настоящей диссертационной работы включают:

- создание модели глубины протаивания грунта для закладки геодезических центров в зоне многолетней мерзлоты с использованием космических снимков в инфракрасном диапазоне;
- привлечение данных спутникового мониторинга для оценки интенсивности эрозионных процессов побережья арктических морей;
- совершенствование методов интерполяции поля глубин протаивания на больших расстояниях при разреженной и неравномерной сети станций наблюдения.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Серебрякова Л.И., Ходаков П.А., К вопросу о постановке работ на прогнозных геодинамических полигонах. - М.: Геодезия и картография, № 5, 2006, № 5: - с. 27-35.
2. Ходаков П.А., Примеры некоторых зарубежных геодезических центров применительно к GPS-измерениям. - М.: Геодезия и картография, 2006, № 9: - с. 15-18.
3. Ходаков П.А. Разработка проекта Альбома типов центров и реперов. - М.: Известия ВУЗов. «Геодезия и аэрофотосъемка», специальный выпуск, 2006: - с. 29-31.
4. Ложкин А.О., Ходаков П.А. Исследование стабильности геодезических центров в районе вечной мерзлоты. - М.: Геодезия и картография, 2012, № 3: - с. 21 – 26.
5. Ходаков П.А., Басманов А.В., О состоянии геодезических пунктов в секторе Российской Арктики (на примере морей Лаптевых и Восточно-Сибирского). - М.: Известия вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка», 2014, № 4: - с. 29 – 31.
6. Ходаков П.А. Составление карты районирования территории Якутии для расчета глубины закладки геодезических центров и реперов. - М.: Геодезия и картография, 2014, № 11: - с. 5-12.
7. Ходаков П.А. Экспериментальная проверка состояния заложенных типов центров на территории Якутии. - М.: Геодезия и картография, 2015, № 4: - с. 22-26.
8. Непоклонов В.Б., Ходаков П.А. Анализ характеристик пунктов государственных нивелирных сетей I и II классов в историческом и географическом аспекте. - М.: Геодезия и картография, 2015, №7: - с. 14-18.
9. Непоклонов В.Б., Ходаков П.А. Сравнение методов интерполяции при построении карты протаивания территории Якутии для расчета глубин закладки геодезических центров. - М.: Геодезия и картография, 2016, № 6: - с. 44-49.