

На правах рукописи

Абжапарова Динара Амалбековна



Разработка методики выбора вида и параметров специальных геодезических  
проекций при выполнении инженерно-геодезических работ

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
Мазуров Борис Тимофеевич.

Официальные оппоненты:

Виноградов Аркадий Васильевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», профессор кафедры геодезии и дистанционного зондирования землеустроительного факультета;

Афонин Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», доцент кафедры «Инженерная геодезия».

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (г. Омск).

Защита состоится 19 декабря 2017 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий»:  
<http://sgugit.ru/science-andinnovations/dissertation-councils/dissertations/abzharov-dinara-kamalbekovna/>

Автореферат разослан 1 ноября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е. И. Аврунев

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 16.10.2017. Формат 60 × 84 1/16.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ  
Редакционно-издательский отдел СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Развитие инженерно-геодезических работ определяет повышенные требования к минимальности искажений при создании картографических материалов о местности, где выполняется проектирование, изыскание, строительство и эксплуатация, и о самом объекте строительства. Поэтому в инженерно-геологических и геофизических работах, в гидроэнергостроительстве, градостроительстве, в промышленном и гражданском строительстве, в горно-маркшейдерских работах востребованы специальные геодезические проекции и системы координат. Конечно, это должны быть конформные проекции, оптимально подходящие для решения инженерно-геодезических задач для конкретной территории. Вопрос выбора вида и параметров (характеристик) геодезической проекции для многих инженерных объектов, городских работ актуален. Кроме размеров картографируемой территории, в предгорных и горных районах важен учет ее средней высоты над эллипсоидом.

Известно, что применение проекции Гаусса – Крюгера целесообразно для территорий, вытянутых с севера на юг, проекции Ламберта – с запада на восток, стереографических проекций – для формы территорий, близкой к круглой. Стереографическую проекцию желательно использовать при выполнении геодезических и топографических работ, инженерных изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, межевании земель, ведении кадастров и осуществлении иных специальных работ.

В последнее время методические решения касались, в основном, введения региональных, местных систем координат. Научные исследования в области уточнения, адаптации алгоритмов обработки геодезических данных к современному уровню геодезических приборов, информационных и ГНСС-технологий позволят обеспечить оперативное и достоверное получение геодезической информации для удобного использования в очень многих отраслях экономики. Выбор вида и параметров специальных геодезических проекций локальных

территорий, для которых востребовано необходимое по точности инженерно-геодезическое обеспечение, недостаточно обоснован. Актуальными являются уточнения алгоритмов преобразования координат многих видов геодезических проекций.

Поэтому возникает потребность в разработке методики выбора вида, параметров специальных геодезических проекций при выполнении инженерно-геодезических работ, обеспечивающих уменьшение линейных искажений и удобство в практическом использовании.

*Степень разработанности темы.* Решению вопросов применения геодезических проекций посвящено большое количество научных работ. Основы теории переноса элементов сферы или эллипсоида на плоскость заложены Гауссом К. Ф., Крюгером Л., Ламбертом И. Г., Шрейбером О., Христовым В. К. и др. Практическое применение проекции Гаусса – Крюгера в СССР впервые выполнялось Келлем Н. Г., затем было продолжено Красовским Ф. Н., Изотовым А. А., Вировцем А. М., Лариным Д. А., Рабиновичем Б. Н. Использовались теоретические концепции и практические рекомендации Виноградова А. В., Герасимова А. П., Зенина В. Н., Подшивалова В. П. и др.

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационной работы является разработка методики выбора вида и параметров специальных геодезических проекций при выполнении инженерно-геодезических работ.

*Основные задачи* диссертационного исследования:

- информационно-аналитический анализ предметной области и обзор существующих решений использования геодезических проекций;
- разработка алгоритма определения вида и параметров специальной геодезической проекции для картографирования территорий строительства и эксплуатации инженерных объектов;
- создание алгоритмов и программного обеспечения, являющихся частью методики для сравнения различных специальных проекций с целью обеспечения минимальности линейных искажений;

– проведение вычислительных экспериментов на модельных и реальных объектах с целью проверки правильности и эффективности разработанной методики и алгоритмов.

*Объект и предмет исследований.* Объектом исследований является картографическое и геодезическое обеспечение проектирования строительства инженерных объектов в горной местности.

*Предметом* исследований является выбор геодезической проекции, позволяющей уменьшить линейные искажения элементов местности и геометрических параметров сооружений.

*Научная новизна* исследования заключается в следующем:

– впервые определены рациональные для практического использования в инженерной геодезии формулы связи прямоугольных координат проекций – поперечно-цилиндрической (Гаусса – Крюгера), стереографической (Гаусса) и геодезических координат;

– разработана новая методика выбора вида и параметров секущей плоскости специальных геодезических проекций, обеспечивающая значимое снижение линейных искажений переноса на плоскость геодезических измерений при обеспечении геодезического контроля геометрических параметров инженерных объектов;

– теоретически обосновано значимое влияние высоты территории на точность редуцирования геодезических измерений при инженерных работах, для исключения этого влияния предложен алгоритм использования секущего эллипсоида.

*Теоретическая и практическая значимость работы.*

*Теоретическая* значимость заключается в математическом дополнении алгоритмов геодезических проекций в отношении локальных горных территорий.

*Практическая* значимость работы заключается в создании общедоступных и удобных компьютерных программ, реализующих вычислительные элементы разработанной методики выполнения инженерно-геодезических работ для проектирования и строительства инженерных сооружений.

*Методология и методы исследования.* Теоретические и прикладные исследования выполнялись на научной основе при использовании теории конформных проекций, методов сфероидической геодезии, математического моделирования и теории погрешностей.

*Положения, выносимые на защиту:*

– методика выбора вида и параметров специальных геодезических проекций позволяет обеспечить минимальность линейных искажений при выполнении инженерно-геодезических работ;

– результаты исследования влияния редуцирования на секущий эллипсоид подтверждают возможность использования упрощенного варианта учета средней высоты территории;

– созданные алгоритмы определения вида и параметров специальной геодезической проекции и их программная реализация позволяют автоматизировать этапы проектирования, математической обработки геодезических измерений и картографического обеспечения инженерно-геодезических работ.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Диссертационная работа соответствует областям исследования: 5 – Методы, технические средства и технологии геодезического обеспечения строительного-монтажных, кадастровых, землеустроительных, проектно-изыскательских, маркшейдерских, геолого-разведочных и лесоустроительных работ, освоения шельфа; монтажа, юстировки и эксплуатации технологического оборудования; 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов паспорта специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

*Степень достоверности и апробация результатов исследования.* Достоверность результатов исследования базируется на использовании существующих теоретически обоснованных и проверенных на практике методов реализации геодезических проекций. Прикладное применение полученных результатов подтверждает обоснованность выводов данной работы. Проверка работоспособности и эффективности разработанной методики, а также оценка достоверности полученных результатов осуществлялись путем проведения численных экспериментов с использованием реальных и смоделированных результатов измерений.

Разработанная методика решения инженерно-геодезических задач в горной местности с использованием специальных геодезических проекций внедрена в работу Государственной картографо-геодезической службы Кыргызской Республики для координатного обеспечения мониторинга предполагаемых оползней, лавин, грозных явлений и пр.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на II Международной межвузовской научно-практической конференции-конкурсе научных докладов студентов и молодых ученых и «Инновационные технологии и передовые решения» (г. Бишкек, 2014), Международной научно-практической конференции на тему «Роль науки и образования в современных условиях глобализации» (г. Ош, 2015), Международной научно-практической конференции «Инновации в областях строительства транспортных сооружений: становление, проблемы, перспективы» (г. Бишкек, 2016), XI–XIII Международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (г. Новосибирск, 2015–2017).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс следующих вузов: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Ошский государственный университет, Ошский технологический университет им. М. М. Адышева.

*Публикации по теме диссертации.* Основные результаты диссертационного исследования представлены в 10 публикациях, в том числе 5 статей напечатаны в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, получено свидетельство № 448 государственной патентной службы Кыргызской Республики о регистрации программы для ЭВМ.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 132 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 161 наименование, содержит 10 таблиц, 34 рисунка, 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, определены цель и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

*В первом разделе* выполнен обзор существующей нормативно-правовой базы, используемой при создании крупномасштабных топографических карт и планов, приведены требования к точности и целесообразности использования геодезических проекций для инженерно-геодезических и маркшейдерских работ, включая инженерно-геологические и геофизические работы, гидроэнергостроительство, градостроительство, промышленное и гражданское строительство, горно-маркшейдерские работы. Сделан обзор геодезических проекций и их характеристик, используемых в настоящее время в различных странах, а также примеров установления государственных и местных систем координат.

*Второй раздел* посвящен геодезическим проекциям для локальных территорий. Рассмотрены конические конформные проекции, их применение, достоинства и недостатки. Представлены алгоритмы стереографических проекций

Руссия и Гаусса. Изложены теоретические основы конформной стереографической проекции Гаусса для инженерно-геодезических работ. Даны основная характеристическая функция, формулы вычисления прямоугольных координат стереографической проекции Гаусса по координатам Гаусса – Крюгера и геодезическим и наоборот. Приведены формулы для вычисления масштаба изображения проекции Гаусса, редуцирования расстояний конформной стереографической проекции в определении Гаусса, сближения меридианов. Отмечены достоинства применения стереографической проекции и системы координат для инженерно-геодезических сетей на территориях, имеющих форму, близкую к круглой.

*В третьем разделе* приведены особенности геодезических работ в высокогорных территориях (на примере Республики Кыргызстан). Описаны возможности использования спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS для создания геодезических сетей с координатами в стереографической проекции Гаусса. Приведен пример перевычисления координат из проекции Гаусса – Крюгера в координаты стереографической проекции Гаусса.

*В четвертом разделе* представлены основные результаты диссертационного исследования, подтверждающие достижение цели и защищаемые положения. Описаны вычислительные эксперименты проверки и практическая реализация разработанной методики выбора вида и параметров специальных геодезических проекций для городских и инженерно-геодезических работ, алгоритмы и программное обеспечение вычислительных этапов методики.

Исследовались линейные искажения при использовании поперечно-цилиндрической проекции Гаусса – Крюгера, УТМ, конической проекции Ламберта и стереографической проекции Гаусса на примере территории Кыргызстана. Подтверждена геометрическая основа видов геодезических проекций. Отмечено, что выбор конкретной геодезической проекции, в первую очередь, определяется целью отображения территорий, имеющих размеры в сотни километров. Например, для проектирования линейных сооружений федерального

значения (автомобильные и железные дороги, линии электропередачи, нефтегазопроводы и др.). В этих задачах более целесообразным и эффективным является использование масштабов 1 : 200 000, 1 : 100 000.

Соблюдение минимальности линейных искажений может быть успешно достигнуто с использованием стереографических проекций, имеющих некоторые преимущества в сравнении с проекцией Гаусса – Крюгера. Особенно эти достоинства проявляются для локальных территорий, имеющих форму, близкую к круглой.

Стереографическую проекцию желательно использовать при выполнении геодезических и топографических работ, инженерных изысканиях, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений, межевании земель, ведении кадастров и осуществлении иных специальных работ. Наиболее важны для геодезических приложений две стереографические проекции со свободно выбираемой центральной точкой – в определении Гаусса или Руссилья. Геометрически проекцию Руссилья представляют как перспективную проекцию изображения земной поверхности на эллипсоиде (шаре) на касательную плоскость (рисунки 1, 2).

Существует модифицированный вариант реализации стереографической проекции Руссилья с проецированием эллипсоида на секущую плоскость, что предполагает уменьшение линейных искажений по сравнению с проекцией Гаусса – Крюгера. Этот вариант аналогичен проекции УТМ в случае использования поперечно-цилиндрической проекции.

Если совместить начало координат системы Гаусса – Крюгера и секущей проекции, достаточно просто осуществляется связь между абсциссами этих координат. Основой соотношения являются характеристические функции проекций на касательную плоскость 1 и секущую 2, геометрический смысл которых поясняют рисунки 1, 2 и формулы (1), (2):

$$x_P = 2R_0 \operatorname{tg} \frac{s}{2R_0}, \quad (1)$$

$$x_{\Gamma} = 2R_0 \sin \frac{s}{2R_0} = 2R_0 \sin \frac{X - X_0}{2R_0}, \quad (2)$$

где  $R_0$  – средний радиус кривизны;

$X_0$  – координата центра проекции (расстояние от экватора по меридиану);

$X$  – координата любой точки территории от экватора;

$x_P, x_{\Gamma}$  – координаты точки в стереографической проекции для касательной и секущей плоскостей.

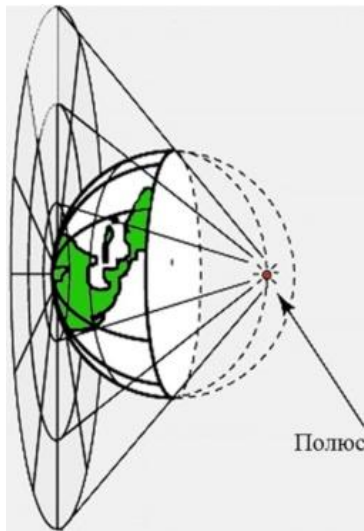


Рисунок 1 – Стереографическая проекция

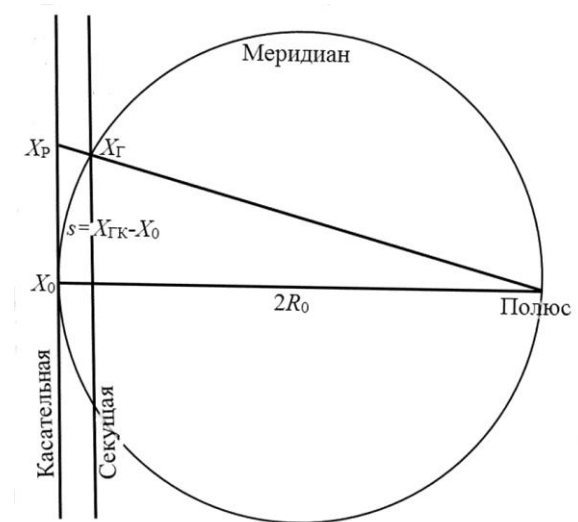


Рисунок 2 – Касательная и секущая плоскости

Размеры территорий круглой формы, для которых относительные линейные искажения приняты  $\frac{\Delta d}{d} \leq \frac{1}{25\,000}$ , следующие: радиус 112 км и площадь 39 400 км<sup>2</sup>. Для таких территорий обеспечивается необходимая точность выполнения большинства городских и инженерно-геодезических работ.

Применяемые системы координат стереографической проекции Гаусса для инженерно-геодезических работ и отдельных городов можно использовать и для решения общегосударственных задач.

В пределах ширины трехградусной зоны в проекции Гаусса – Крюгера значения координат для двух исходных пунктов в системе координат стереографической проекции Гаусса можно вычислять по формулам

$$\begin{aligned}x_G &= x_{GK} - \frac{x_{GK} y_{GK}^2}{4M_0^2} + \frac{x_{GK}^3}{12M_0^3}, \\y_G &= y_{GK} + \frac{x_{GK}^2 y_{GK}}{4M_0^2} - \frac{y_{GK}^3}{12M_0^3},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $x_G, y_G, x_{GK}, y_{GK}$  – координаты точки в проекциях Гаусса и Гаусса – Крюгера соответственно;

$M_0$  – радиус кривизны меридиана в центральной точке проекции.

Для практики большинства инженерно-геодезических работ соотношения между длинами сторон геодезических сетей в проекциях достаточно выразить формулой

$$s_G = s_{GK} \left( 1 + \frac{x_m^2 - y_m^2}{4M_0^2} \right)_{GK},\tag{4}$$

где  $s_G, s_{GK}$  – значения расстояния в проекции Гаусса и в проекции Гаусса – Крюгера;

$m$  – середина линии (хорды).

Стереографическая проекция для инженерно-геодезических работ в среднем дает вдвое меньшие искажения, чем проекция Гаусса – Крюгера, что позволяет в большинстве случаев ими пренебречь. Учитывая в целом конформность изображения новой проекции, минимальность искажений расстояний и редукции направлений, единообразие систем координат, простую связь с проекцией Гаусса – Крюгера, рекомендуется ее использование для многих инженерно-геодезических работ.

Обратная связь выражается формулами

$$x_{GK} = x_G + \frac{x_G y_G^2}{4M_0^2} - \frac{x_G^3}{12M_0^3},$$

$$y_{GK} = y_G - \frac{x_G^2 y_G}{4M_0^2} + \frac{y_G^3}{12M_0^3}.$$
(5)

Производить учет средней высоты территорий над отсчетным эллипсоидом предлагается с помощью некоторого масштабного коэффициента, основанного, например, на соотношении

$$N_{0; \text{сек}} = N_0 + H_{\text{сек}},$$
(6)

где  $N_{0; \text{сек}}$  – радиус первого вертикала секущего (вспомогательного) эллипсоида;

$N_0$  – радиус первого вертикала отсчетного эллипсоида;

$H_{\text{сек}}$  – средняя высота локального участка.

Анализировались качества стереографических проекций для отображения локальных территорий круглой формы, а именно – определение величины линейных искажений при переходе на плоскость в сравнении с другими проекциями, в частности, с проекцией Гаусса – Крюгера.

В диссертационной работе выполнена проверка методики подбора секущей плоскости для стереографической проекции Руссиля с учетом формул (1), (2) на примере триангуляционной сети (рисунок 3).

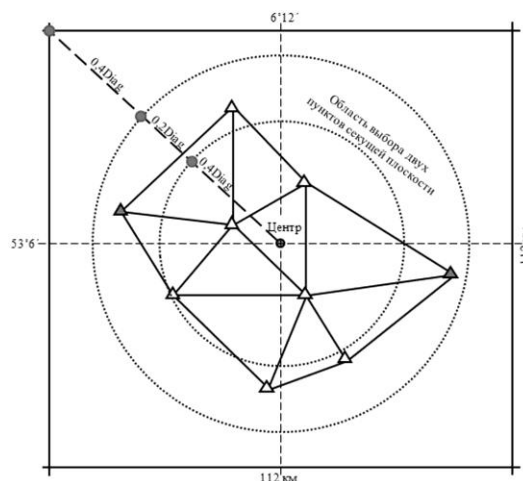


Рисунок 3 – Сеть триангуляции

Методика перехода с касательной проекции на секущую плоскость в данной сети предлагается следующая:

- для сети, как средние арифметические координат всех пунктов, определяются координаты геометрического центра стереографической проекции;
- выполняется совмещение начала системы координат Гаусса – Крюгера с началом системы координат стереографической проекции;
- устанавливаются два пункта сети, расположенные по разные стороны от центра в некотором удалении от него. Выбор пунктов предлагается выполнять внутри кольца, обозначенного на рисунке 3 пунктирными окружностями;
- производится пересчет координат этих двух пунктов из местной системы координат Гаусса – Крюгера в систему координат секущей плоскости в соответствии с формулами (2), (3);
- по полученным координатам и измеренным углам выполняется расчет координат всех остальных пунктов сети с использованием метода наименьших квадратов.

В диссертационной работе сделан анализ линейных искажений для двух проекций по линии между пунктами, принятыми за опорные. Ее расстояние в пространстве  $d = 114\,210,741$  м, принята высота  $H_{\text{сек}} = 1\,000$  м.

При использовании проекции Гаусса – Крюгера была вычислена длина между этими пунктами на плоскости  $d = 114\,213,863$  м. Относительное искажение соответственно  $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{36\,583}$ . При использовании стереографической проекции длина между этими пунктами на плоскости  $d = 114\,213,387$  м. Относительное искажение соответственно  $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{43\,159}$ , следовательно, искажения уменьшились на 17 %.

Ориентация относительно координатных осей объекта картографирования для крупных масштабов не играет роли. Но, алгоритмы преобразования, их детальность в разложении рядов уже начинает в этих алгоритмах проявляться по мере перехода к крупным масштабам карт.

Для карт масштаба 1 : 50 000 и крупнее был выполнен вычислительный эксперимент по оценке точности редуцирования на эллипсоид расстояний с физической поверхности Земли и далее – проецирование на плоскость.

Была выбрана реально существующая территория в Республике Кыргызстан, а именно – район высокогорного тоннеля Тоо-Ашуу трассы Бишкек – Ош. Тоннель располагается на высоте 3 125–3 400 м и имеет протяженность 2,6 км. Местная система координат в эксперименте была основана на центральном (осевом) меридиане  $73^{\circ} 50'$ . Для конической проекции Ламберта (стандартная параллель) и центральной точки стереографической проекции Гаусса была назначена также широта параллели  $42^{\circ} 20'$ . Соответственно, лист карты масштаба 1 : 50 000 определен следующий (рисунок 4). В качестве примера для г. Новосибирска лист карты такого масштаба захватывает почти всю городскую территорию (рисунок 5).

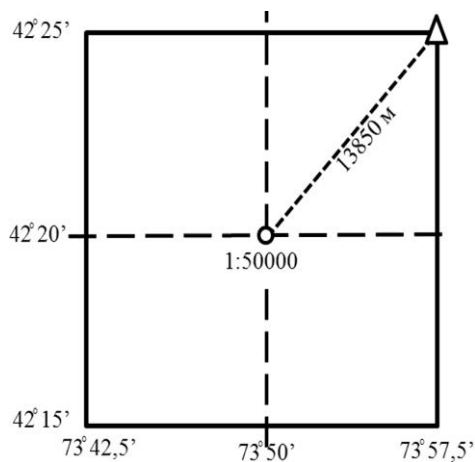


Рисунок 4 – Лист карты масштаба 1 : 50 000 для Тоо-Ашуу



Рисунок 5 – Территория г. Новосибирска

В диссертации вычислены возникающие в самой удаленной точке от центра местной системы координат линейные искажения (в сантиметрах) для расстояния 1 000 м при использовании трех конформных проекций. Это поперечно-цилиндрическая (местная) проекция, коническая проекция Ламберта и стереографическая проекция Гаусса в двух вариантах: с секущей плоскостью и без нее.

Оценка результатов вычислительного эксперимента далее осуществлялась с учетом существующих требований к точности топографических карт и планов. Средние ошибки положения контуров на карте или плане относительно съемочного обоснования независимо от масштаба карты или плана не должны превышать 0,5 мм – при углах наклона местности до 6°; 0,7 мм – в горных и за- лесенных районах. Предельная ошибка взаимного положения контуров в капи- тальной застройке не должна превышать 0,4 мм. Средние квадратические ошибки положения точек съемочного обоснования относительно ближайших пунктов геодезического обоснования не должны превышать 0,1 мм в плане и 0,1 высоты сечения рельефа. Выполненные в работе исследования подтверди- ли положительные качества поперечно-цилиндрической (местной) и стереогра- фической проекций.

Переход с эллипсоида на плоскость в стереографической проекции сопро- вождается меньшими искажениями, чем в стандартной проекции Гаусса – Крю- гера. Границы области применения проекции для сетей сгущения съемочного обоснования и съемок определены с учетом формулы

$$s_G = 2N_0 \sqrt{\frac{\Delta S}{S}}, \quad (7)$$

где  $\Delta S$  – величина линейного искажения при проецировании на плоскость.

Для исходной стороны триангуляции 4-го класса при  $\Delta S : S = 1 : 100\,000$  по- лучим:

$$s_G = 2 \cdot 6\,400 \sqrt{\frac{1}{100\,000}} = 40 \text{ км.}$$

Площадь территории круглой формы в данном случае будет равна:

$$S = \frac{3}{4} \cdot 40^2 = 5\,000 \text{ км}^2.$$

Таким образом, если принять за начало координат в стереографической проекции какую-либо точку, расположенную на ближайшем осевом меридиане

зоны с широтой изображаемого города, то на площадь  $5\,000\text{ км}^2$ , т. е.  $70 \times 70\text{ км}^2$ , при относительной точности  $1 : 100\,000$ , линейными искажениями городской триангуляции можно будет пренебречь.

Для городской полигонометрии всех разрядов линейными искажениями  $1 : 20\,000$  и ниже можно пренебречь на площади

$$S \approx 3,14 \times (80\text{ км})^2 \approx 20\,000\text{ км}^2 \approx 140\text{ км} \times 140\text{ км}.$$

В диссертационной работе приведены значения величины линейных искажений в стереографической проекции Гаусса для инженерно-геодезических работ в зависимости от их удаленности от центра стереографической проекции.

Выполнен вычислительный эксперимент по оценке степени влияния введения секущего эллипсоида, выбранного для высокогорной территории, на результаты проецирования на плоскость. Расчеты делались для двух точек  $P$  и  $P'$  в одной меридианной плоскости (рисунок 6).

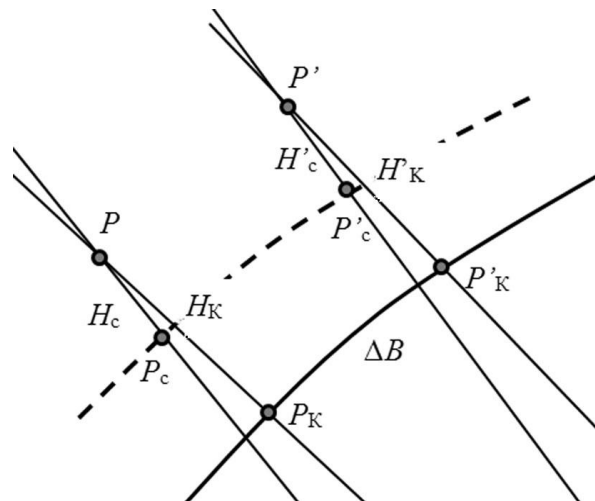


Рисунок 6 – Сравнение редуцирования на эллипсоид Красовского и секущий

На геодезической высоте  $3\,000\text{ м}$  между точками  $P$  и  $P'$  (см. рисунок 6) было выбрано расстояние  $S_{PP'} = 1\,851,485\text{ м}$ , ( $\Delta B = 1'$ ). После ее редуцирования на эллипсоид Красовского и на секущий эллипсоид были получены значения  $1\,850,612\text{ м}$  и  $1\,851,481\text{ м}$ . На секущем эллипсоиде расстояние по меридиану

стало больше, чем на эллипсоиде Красовского. Разность редуцированных расстояний 0,869 м. В относительной мере это соответствует  $1/2\ 130$ .

Вторая линия с исходным расстоянием между точками  $P$  и  $P'$   $S_{PP'} = 111\ 097,131$  м, ( $\Delta B = 1^\circ$ ). После ее редуцирования на эллипсоид Красовского и на секущий эллипсоид были получены значения 111 046,181 м и 111 098,339 м. Разность редуцированных расстояний 52,158 м. В относительной мере это соответствует также  $1/2\ 130$ .

Полученные результаты свидетельствуют, что изменение длин линий после их редуцирования на секущий эллипсоид в горных и предгорных районах значимо и требует учета при использовании алгоритмов геодезических проекций для получения плоских координат.

Главное технологическое положительное решение по итогам проведенного исследования состоит в том, что имеющиеся алгоритмы по использованию геодезических проекций могут быть упрощенно реализованы без пересчета соответствующих коэффициентов. Выполненные расчеты по авторским программам количественно подтвердили значимое уменьшение линейных искажений путем проецирования с эллипсоида на секущую плоскость в стереографической проекции.

Методика выбора вида и параметров геодезической проекции для выполнения инженерно-геодезических работ следующая:

- оценить размер территории, для которой будут выполняться изыскательские, строительные, эксплуатационные работы; выбрать крайние точки территории в широтном и долготном направлениях;

- по координатам этих точек и средней высоте территории назначаются параметры геодезических проекций: долгота осевого меридиана, широты стандартных параллелей, широта и долгота центральной точки, высота секущей поверхности (вспомогательного) эллипсоида (рисунок 7);

- использовать компьютерную программу, реализующую проецирование пункта территории с известными геодезическими координатами с эллипсоида на плоскость для семи видов геодезических проекций;

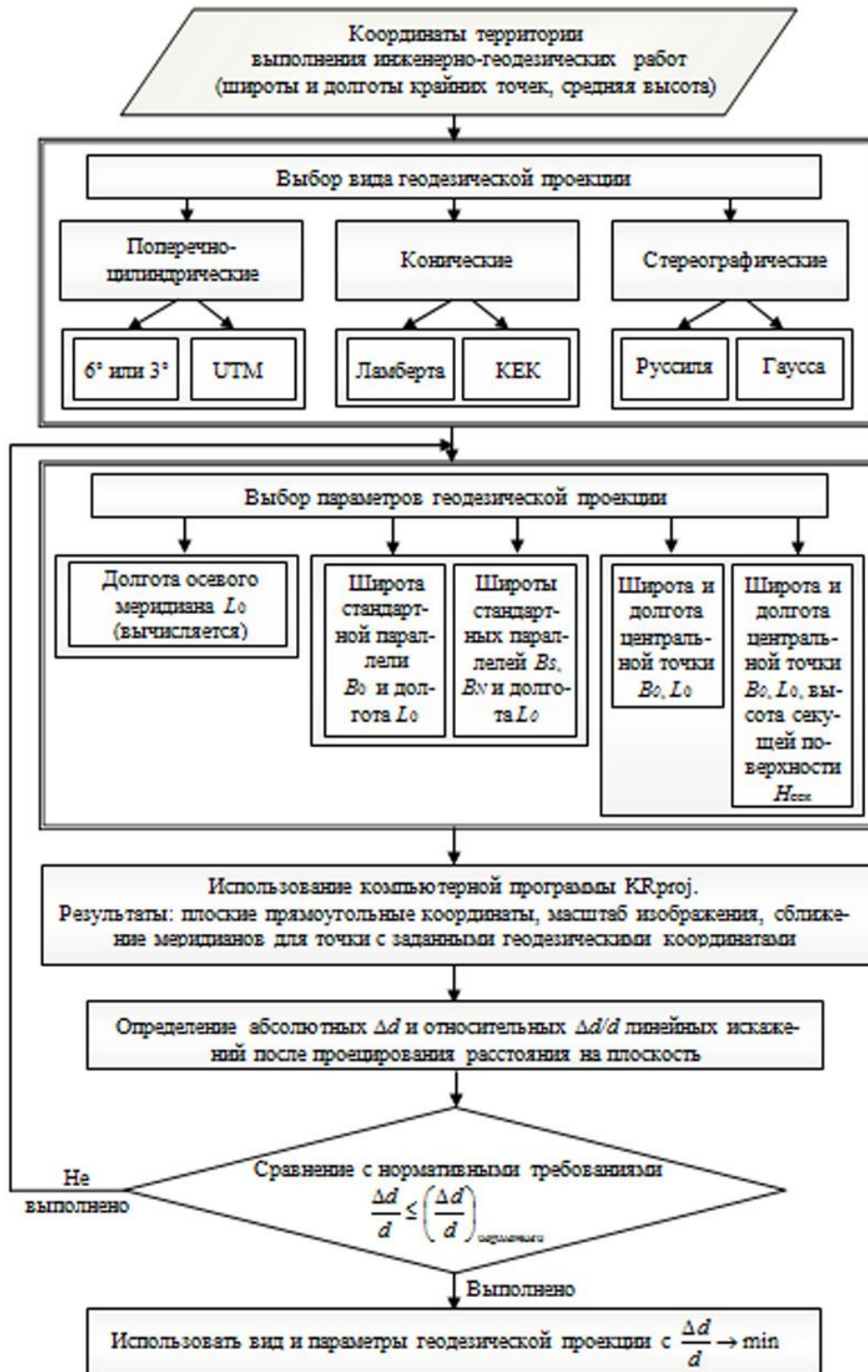


Рисунок 7 – Блок-схема методики выбора вида и параметров геодезической проекции

– рассчитанные характеристики проецирования крайних точек (плоские координаты, масштаб изображения и др.) использовать для экспертной оценки

качеств различных видов проекций. Для выбора наилучшей проекции предлагается критерий минимальности линейных искажений в крайних точках и в середине территории с учетом нормативных документов,  $\frac{\Delta d}{d} \rightarrow \min$  при

$$\text{выполнении } \frac{\Delta d}{d} \leq \left( \frac{\Delta d}{d} \right)_{\text{нормативн}}$$

Вычислительные эксперименты выполнялись по собственным компьютерным программам, написанным в среде Delphi7 и зарегистрированным в виде свидетельства в государственной патентной службе Республики Кыргызстан. Программа KProj (рисунок 8) позволяет выполнять преобразования геодезических координат с поверхности эллипсоида Красовского в плоские.

Это позволяет оценить и выбрать наиболее подходящую геодезическую проекцию. Все предлагаемые проекции, кроме КЕК, конформные (без искажения углов). KProj уже используется при создании карт для городских и инженерно-геодезических работ. Есть возможность учета высокогорья, через введение секущей плоскости, позволяющей уменьшить линейные искажения.



Рисунок 8 – Окно программы KProj

Алгоритм программы следующий:

– вводятся геодезические координаты пункта ( $B, L, H$ );

– выбираются необходимые для оценки конформные проекции (на рисунке 8 панель слева) и для некоторых добавляются необходимые параметры:

1) КЕК (коническая эквивалентная, равноплощадная Кыргызстана) – широты южной и северной стандартной параллелей  $B_S$  и  $B_N$ , долгота осевого меридиана;

2) конической Ламберта и стереографической Руссиля – широта и долгота центральной точки проекции  $B_0$  и  $L_0$ ;

3) стереографической Гаусса – широта и долгота центральной точки проекции  $B_0$  и  $L_0$  и высота секущей плоскости;

– выполняется преобразование с учетом этих параметров и классических формул (7). Для стереографической проекции Гаусса учитывается высота секущей плоскости;

– счет, изучение результатов и экспертная оценка исследованных проекций для выбранного района городских или инженерно-геодезических работ.

Была также создана и использована программа GeodelS, позволяющая вычислить характеристики геодезических проекций, которые могут быть использованы для создания карт и планов. В программе определяются плоские координаты в местной поперечно-цилиндрической проекции, конической проекции Ламберта, стереографических проекциях Руссиля и Гаусса. Оцениваются линейные искажения. Результаты вычислений позволяют дополнительно оценить выбранную в смысле минимальности линейных искажений специальную геодезическую проекцию.

Программа может быть использована для геодезического обеспечения проектирования, строительства и эксплуатации инженерных объектов, территорий городов, в том числе с учетом высокогорья.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного диссертационного исследования достигнута поставленная цель – разработана методика выбора вида и параметров специальных геодезических проекций при выполнении инженерно-геодезических работ, обеспечивающая уменьшение линейных искажений и удобство в практическом использовании.

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен информационно-аналитический анализ предметной области использования геодезических проекций, в результате которого установлено, что для инженерно-геодезических работ, проведенных в горной местности, необходима специальная проекция, которая обеспечивает минимальные искажения линейных элементов местности, пространственного и взаимного положения строящихся зданий и сооружений;

– разработана методика выбора вида и параметров секущей плоскости в специальной геодезической проекции, обеспечивающая существенное уменьшение линейных искажений при переносе измеренных величин на плоскость при выполнении инженерно-геодезических работ для картографирования территорий строительства и геодезического контроля геометрических параметров инженерных объектов;

– теоретически обосновано значимое влияние высоты территории на точность редуцирования геодезических измерений при инженерных работах и предложен алгоритм использования секущего (вспомогательного) эллипсоида для исключения этого влияния;

– разработаны алгоритмы и программное обеспечение, являющиеся частью методики, для сравнения различных специальных проекций, которые обеспечивают минимальность линейных искажений элементов местности, пространственного и взаимного положения строящихся зданий и сооружений;

– выполнены вычислительные эксперименты на модельных и реальных объектах инженерной геодезии, которые подтвердили правильность и эффективность разработанной методики и алгоритмов.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проведении государственных или отраслевых работ по развитию инженерной инфраструктуры, в городах, на объектах горнодобывающей промышленности, энергетических объектах, для целей прогноза геодинамических и экологических событий. Результаты внедрены в учебный процесс университетов Российской Федерации и Кыргызской Республики. Практическая реализация разработанной методики мониторинга выполнена в Госкартографии Кыргызской Республики. Проверка результатов диссертационного исследования была проведена на реальных объектах – инженерных объектах, расположенных на территории Республики Кыргызстан.

Перспективы дальнейших исследований должны быть направлены на совершенствование разработанной методики в направлении автоматизации процесса выбора специальных проекций для локальных территорий и удобства их использования потенциальными пользователями в соответствующих проектных, изыскательских и геодезических организациях. Важным направлением развития разработанной методики является уточнение алгоритмов преобразований некоторых специальных проекций путем продления аппроксимационных рядов, что позволит расширить класс выбираемых специальных проекций.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абжапарова, Д. А. Обработка специальной геодезической сети в проекции на секущую плоскость (на примере Кировского водохранилища в Кыргызской Республике) [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 14–23.
2. Абжапарова, Д. А. Разработка специального варианта проекции Гаусса – Крюгера для инженерных городских геодезических работ в условиях Рес-

публики Кыргызстан [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 3 (35). – С. 27–34.

3. Абжапарова, Д. А. Решение инженерно-геодезических задач в горной местности с использованием специальных геодезических проекций [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 90–100.

4. Абжапарова, Д. А. Перевычисление координат из проекции Гаусса – Крюгера в координаты стереографической проекции на примере Южного Кыргызстана [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 78–87.

5. Абжапарова, Д. А. Разработка оптимальной геодезической проекции для новой системы координат в условиях Кыргызстана [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник Кыргызско-Рос. Славянского ун-та. – 2017. – Т. 17, № 8. – С. 79–85.

6. Абжапарова, Д. А. Геодезические проекции для инженерно-геодезических работ в горных районах [Текст] / Д. А. Абжапарова. – Свидетельство зарегистрировано в Государственном реестре программ для ЭВМ Кыргызской Республики № 448 10.03.2017.

7. Абжапарова, Д. А. Основная характеристическая функция оптимальной стереографической проекции Гаусса – для инженерно-геодезических работ [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник ОшГУ. – 2012. – № 3. – С. 164–167.

8. Абжапарова, Д. А. Разработка теоретических основ оптимальной секущей конформной стереографической проекции в определении Гаусса [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник ОшГУ. – 2013. – № 3. – С. 214–219.

9. Абжапарова, Д. А. Математическая обработка инженерных геодезических сетей в стереографической проекции Гаусса [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). – С. 27–32.

10. Абжапарова, Д. А. Исследование формулы связи в местной системе прямоугольных стереографических координат с координатами Гаусса – Крюгера [Текст] / Д. А. Абжапарова // Вестник ОшГУ. – 2015. – № 1. – С. 140–144.