

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПОЛЕВОЙ ГЕОФИЗИКИ

Станислав Олегович Шевчук

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, 120, лит. ЕЦ, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, тел. (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Елена Сергеевна Черемисина

АО «Российский институт радионавигации и времени», 192012, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, 120, лит. ЕЦ, начальник отдела, тел. (911)255-65-58, e-mail: lenushk@mail.ru

Вячеслав Николаевич Никитин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотограмметрии и дистанционного зондирования, тел. (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Юрий Михайлович Зюзин

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и Минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, зав. лабораторией полевой геофизики, тел. (383)222-48-55, e-mail: zyuzin54@mail.ru

Андрей Хельдурович Мелеск

АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 67, ведущий инженер, тел. (383)22-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

Сергей Владимирович Барсуков

ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», 630007, Россия, г. Новосибирск, ул. Октябрьская магистраль, 4, оф. 1207, ведущий геофизик, тел. (913)717-21-70, e-mail: turmalin@ngs.ru

В статье приводится описание некоторых вспомогательных алгоритмов, необходимых при проектировании и выполнении навигационного и геодезического обеспечения геолого-геофизических работ. Данные работы включают в себя ряд нестандартных задач, решение которых может быть автоматизировано, что позволит снизить временные затраты на их решение вручную. В частности, к таким функциям относятся: задачи проектирования работ (осреднение, разбиение, параллельный перенос), анализ траектории (выделение остановок, проверка траекторий на наличие разрывов, анализ данных отдельных эпох), редукция точек траектории.

Указанные функции реализованы в авторской программе RouteEditor, испытаны специалистами геофизического профиля и могут применяться на практике. В статье суммируются как новые функции, так и рассмотренные ранее. Часть алгоритмов рассмотрена подробно, с описанием алгоритмов. Рассмотрены реальные работы, на которых данные функции применялись.

Ключевые слова: геодезическое обеспечение, ГНСС, навигация, геолого-геофизические работы, автоматизация, ГИС, routenav

AUTOMATIZATION FOR GEODETIC SUPPORT ISSUES OF FIELD GEOPHYSICS

Stanislav O. Shevchuk

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, Prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russia, Ph. D., Leading Scientific Worker, phone: (903)936-78-53, e-mail: staspp@211.ru

Elena S. Cheremisina

Russian Institute of Radionavigation and Time, 120, EC, Prospect Obukhovskoy Oborony, Saint Petersburg, 192012, Russia, Leading Engineer, phone: (911)255-65-58, e-mail: escheremisina@gmail.com

Vyacheslav N. Nikitin

Siberian State University of Geosystems and Technology, 10, Plakhotnogo St., 630108, Novosibirsk, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, phone: (913)712-37-50, e-mail: vslav.nikitin@gmail.com

Yuri M. Zyuzin

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials (SNIIGGiMS), 67, Krasniy Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russia, Acting as a Head of the Laboratory of Field Geophysics, phone: (383)222-48-55, e-mail: zyuzin54@mail.ru

Andrey Kh. Melesk

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials (SNIIGGiMS), 67, Krasniy Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russia, Leading Engineer, phone: (383)222-45-86, e-mail: melesk-a-x@rambler.ru

Sergey V. Barsukov

«Aerogeophysical surveys» company, 4, Oktyabr'skaya magistral' St., Novosibirsk, 630007, Russia, Leading Geophysicist, phone: (913)717-21-70, e-mail: turmalin@ngs.ru

The article overviews the description of some simple but specific algorithms using on navigation and geodetic support of geological and geophysical works. This kind of works contains number of issues that solution can be automatized to provide faster and more efficient production. For example: projecting work points (computing average points, replacing points from line to line etc.), trajectory analysis (stop-points and measuring-slips detection, epochs analysis), trajectory points reduction.

These functions are added to Route Editor utility made by the authors. The functions also tested by professional geophysicists at the real objects with the conclusion that the utility can be used in practice. The article summarized the new functions with the ones that were overviewed in earlier publications. In the article some algorithms are given detailed. The geophysical prospecting works made on the real objects with the utility using are overviewed.

Keywords: geodetic maintenance, GNSS, navigation, geological and geophysical survey, automatization, GIS, routenav

Введение

Исследования земных недр с целью поиска и прогноза ископаемых, изучения строения земной коры и решения ряда инженерно-геологических задач выполняются посредством геофизических методов съемки. Такие методы основаны на исследовании различных полей Земли (электро-магнитного, гравитационного,

гамма-спектрального, сейсмических колебаний и пр.). Исследования Земли геофизическими методами зачастую выполняется дистанционно – посредством выполнения съемки специализированной аппаратурой в отдельных пунктах наблюдения или в движении.

Одним из важнейших технологических процессов, сопровождающих такие исследования является навигационно-геодезическое и топографическое обеспечение [1, 2].

Указанные задачи в настоящее время решаются преимущественно с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и географических информационных систем (ГИС) [2–5].

Указанные системы отличаются универсальностью, а некоторые из них могут быть специально адаптированы под решение задач, возникающих при сопровождении геолого-геофизических работ. Вместе с тем, некоторые задачи являются специфическими, и для их решения были разработаны специальные алгоритмы, которые рассматриваются в рамках данной статьи.

Решение рассмотренных задач рассмотрено на примере алгоритмов, встроенных в авторскую программную утилиту RouteEditor, входящую в поставку специализированного ПО RouteNav [6–8].

Задачи проектирования площадных геофизических съемок

Проектирование геофизических съемок (наземной, аэро- или морской) может содержать различные специфические задачи, решение которых может значительно увеличить время подготовки необходимых данных.

Наиболее простой задачей проектирования съемок, реализованной во множестве программных продуктов, является разбиение участка работ на прямолинейные взаимно параллельные маршруты (при выполнении площадных исследований). В RouteEditor эта возможность также реализована, однако, с учетом специфики геофизических съемок, к рядовым маршрутам могут быть добавлены автоматически опорные маршруты и секущие (вручную), рис. 1.

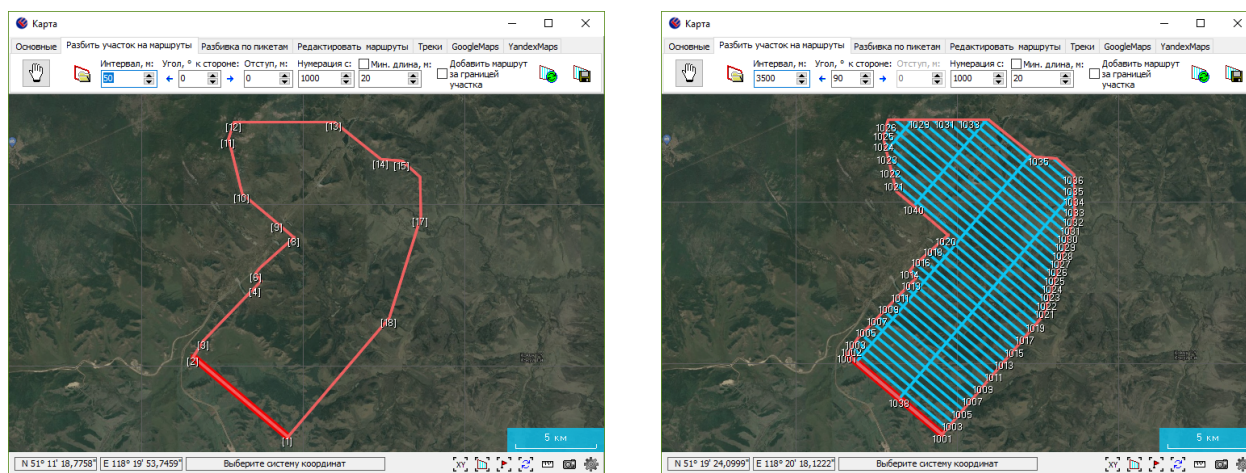


Рис. 1. Разбиение участка геофизической съемки на маршруты в утилите RouteEditor на примере участка «Аленуйский» (Забайкальский край)

Алгоритм предельно прост: задается начальный угол α (может быть задан равным дирекционному углу одной из сторон участка или вручную относительно осевого меридиана текущей зоны). Далее начинается параллельный перенос маршрутов в условной системе координат, в которой ось Oy' направлена вдоль маршрутов, а ось Ox' достраивает ее до правой. Перед этим все точки границ участка переводятся в указанную систему координат по простейшим формулам поворота:

$$x_j' = x_j \cos \alpha + y_j \sin \alpha ; \quad (1)$$

$$y_j' = -x_j \sin \alpha + y_j \cos \alpha ,$$

где x_j' и y_j' – координаты j -й точки границы участка работ в условной системе $Ox'y'$; x_j и y_j – координаты j -й точки границы участка в исходной СК. Угол α равен выбранному азимуту с противоположным знаком.

Далее выбирается точка с минимальным значением абсциссы x'_{min} (от которой начинается цикл создания маршрутов) и максимальным x'_{max} (на которой цикл завершается).

Таким образом, задача сводится к нахождению координат $(y'_1)_i$ начала и конца $(y'_2)_i$ каждого (i -го) маршрута при заданных постоянных $x'_i = (x'_1)_i = (x'_2)_i$, сдвигающихся на заданный шаг Δx от x'_{min} до x'_{max} .

Сама задача разбиения реализуется простейшими формулами линейной алгебры – проверкой попадания точки x_i на отрезок j между смежными точками границ участка с координатами $(x'_j; y'_j)$ $(x'_{j+1}; y'_{j+1})$. В этом случае, учитывая линейность задачи, $(y'_n)_i$ будет получена из простейшей пропорции:

Если $x'_i \in (x_j, x_{j+1})$:

$$(y'_n)_i = y_j + \frac{(x_i - x_j)}{(x_{j+1} - x_j)} (y_{j+1} - y_j), \quad (2)$$

где $n = 1..2$ – точки начала и конца i -го маршрута.

После нахождения массива прямолинейных маршрутов, выполняется их обратный перевод по формуле (1) в геодезическую систему координат участка работ. Угол α при этом будет взят с противоположным знаком.

Полученные маршруты могут применяться как данные для RouteNav, а также конвертироваться в формат GPS eXchange *.gpx, совместимый с приемниками Garmin (и других производителей) и в текстовые каталоги координат.

Указанный алгоритм, реализованный в RouteEditor многократно использовался при проведении аэрогеофизических съемок компанией ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» [9] в частности на участках Аккерман и Ащебутак (Оренбургская область), Аленуйский (Забайкальский край), Кульджуктау (пустыня Кызылкум, Узбекистан) для съемки масштабов от 1:5 000 до 1:25 000.

Создание проекта глубинного сейсмического зондирования

Менее тривиальной является задача проектирования сейсморазведочных работ, в частности, методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Эта задача включает в себя следующие этапы:

1) Исходные координаты начала и конца профиля наносятся на картографическую основу.

2) Выполняется поиск ближайших путей сообщения (по картам, далее – в процессе полевой рекогносцировки).

3) По полученной траектории вдоль ближайшей дороги, зимника или направления строится линия осреднения.

4) Линия разбивается с заданным шагом, точки с нее проецируются обратно на дорогу по нормали к ней.

В процессе полевых работ в данных точках устанавливаются сейсмоприемники, выполняются наблюдения на них и их геодезическая привязка, в результате которой создаются каталоги координат пунктов сейсмических наблюдений.

После выполнения работ также необходимо выполнить обратную задачу: спроецировать точки расстановки обратно на осредняющую линию.

Утилита RouteEditor позволяет максимально эффективно и быстро решить большинство задач указанной технологии. Так поиск путей сообщения может быть выполнен загрузкой карт в окрестностях участка работ с картографических сервисов YandexMaps и GoogleMaps. После получения траектории на участке работ (аналитически или в процессе рекогносцировки), по ней может быть получена линия осреднения, рис. 2. Траектория при этом может быть как импортирована из текстовых таблиц или файлов Garmin GPS eXchange *.gpx или сохраненных измерений протокола NMEA0183. Полностью этапы 1-4, перечисленные выше могут быть реализованы пошаговым скриптом, для вызова которого вызывается специальный режим со списком автоматизированных действий.

Линия осреднения строится методом наименьших квадратов (МНК). Технически это реализовано в виде следующего алгоритма:

– Вычисляются коэффициенты функции $y = ax + b$, описывающей траекторию, по формулам:

$$\begin{aligned} a &= \left(\sigma y - n \frac{\sigma xy}{\sigma x} \right) / \left(\sigma x - n \frac{\sigma x^2}{\sigma x} \right); \\ b &= (\sigma xy - a \cdot \sigma x^2) / \sigma x, \end{aligned} \quad (3)$$

где n – количество точек траектории, а суммы считаются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma x &= \sum_{i=1}^n x_i - x_0; & \sigma y &= \sum_{i=1}^n y_i - y_0; \\ \sigma xy &= \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0); \\ \sigma x^2 &= \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где x_0 и y_0 – координаты начала условной системы координат (для упрощения расчетов) которые, как правило, принимаются равными координатам первой точки траектории в исходной СК.

– По коэффициентам вычисляются координаты концов линии осреднения $\bar{x}_1, \bar{y}_1, \bar{x}_2, \bar{y}_2$:

$$\bar{x}_1 = x_0; \quad \bar{y}_1 = b + y_0; \quad \bar{x}_2 = x_n; \quad \bar{y}_2 = a(x_n - x_0)b + y_0; \quad (5)$$

– Линия опционально продлевается (укорачивается) до точек проецирования по перпендикулярам крайних точек траектории на нее:

$$x'_n = \bar{x}_1 + \frac{\text{ctg } \beta (x_n - \bar{x}_1) + (y_n - \bar{y}_1)}{\text{tg } \beta + \text{ctg } \beta};$$

$$y'_n = \bar{y}_1 + \text{tg } \beta \cdot (x'_n - \bar{x}_1), \quad (6)$$

где x'_n и y'_n – итоговые координаты линии осреднения;

x_n, y_n – координаты начальной ($n = 1$) и конечной ($n = 2$) точек траектории;

β – азимут осредняющей линии в заданной СК:

$$\text{tg } \beta = \frac{(\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}; \quad \text{ctg } \beta = \frac{1}{\text{tg } \beta}. \quad (7)$$

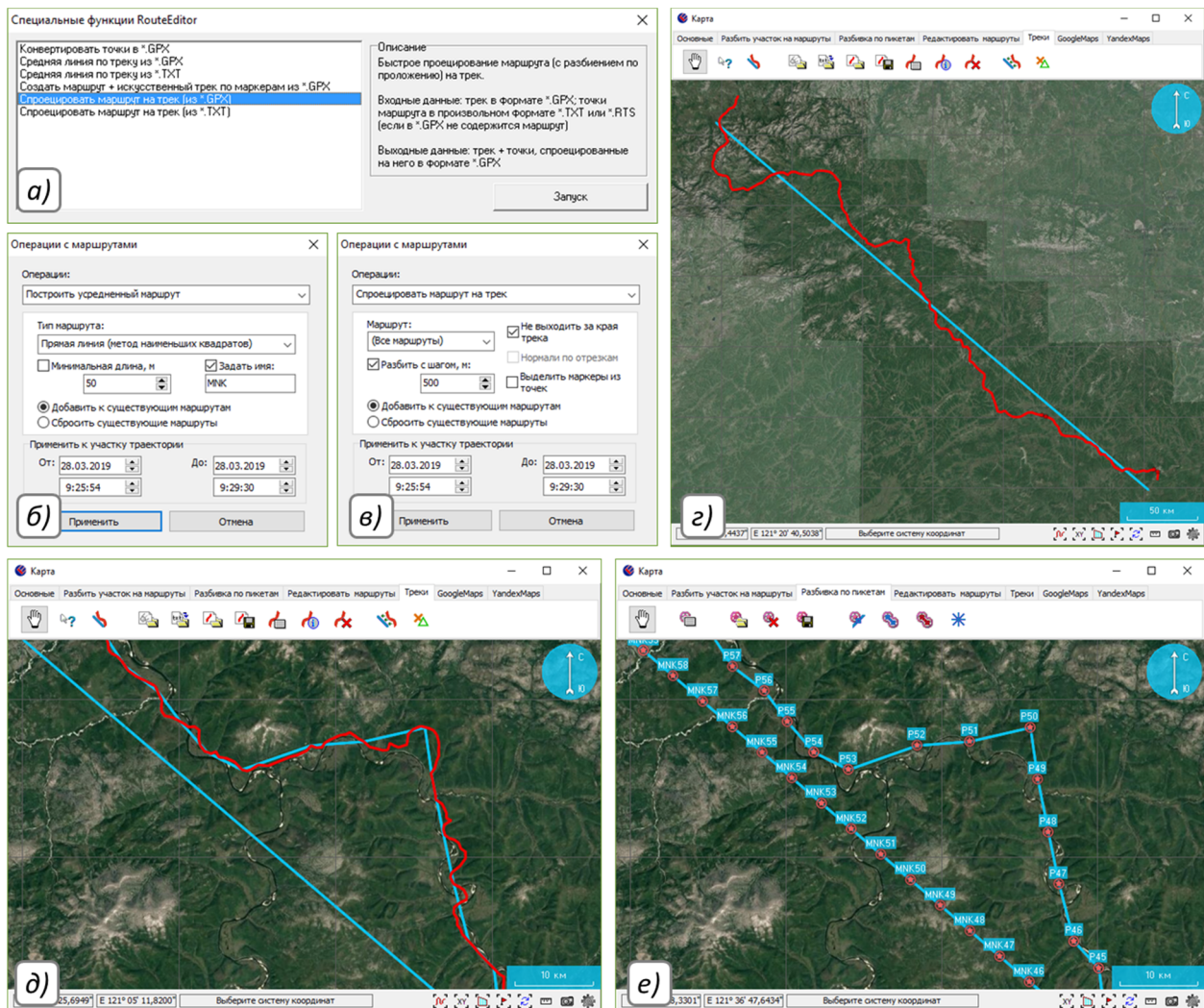


Рис. 2. Получение осредненной линии:

а) автоматические скрипты; б) настройки параметров линии осреднения; в) настройка проекции маршрута на трек; г) полученная линия осреднения; д) результат проецирования на маршрут; е) выделение точек из траектории

Указанные вычисления производятся в проекции Гаусса-Крюгера, в шести-градусной зоне, выбираемой по средней долготе точек проекта. Так как сейсмические исследования происходят на дистанциях в сотни километров, во избежание искажений проецирования полученная линия может быть разбита с заданным шагом на отрезки (по зонам) и/или пересчитана в других проекциях, более подходящих для больших дистанций [10] или (при разбиении больших отрезков) выполняться в градусной мере.

Разбиение осредненной линии осуществляется простой пропорцией с заданным шагом. Если линия составная (кривая для данной проекции), разбиение идет от первой до последней точки в цикле, с учетом остатков с предыдущих отрезков.

Полученные файлы выдаются как в виде каталогов координат, так и могут быть конвертированы в формат навигаторов GPS eXchange (*.gpx) для загрузки в навигационные приемники, применяемые непосредственно в поле.

После завершения полевых работ, как уже было отмечено, необходимо выполнение обратного переноса с траектории на линию усреднения. Эта операция осуществляется аналогично по формулам (6) и (7). При этом осуществляется циклический перебор отрезков траектории с поиском тех, на которые проецируется каждая точка по перпендикуляру к линии осреднения.

На практике указанная технология с использованием RouteEditor применялась АО «СНИИГГиМС» при изучении глубинного строения земной коры методом ГСЗ в Дальневосточном федеральном округе на опорных геолого-геофизических профилях 3-ДВ, 8-ДВ и 1-СБ.

Задачи анализа траектории

После выполнения геофизической съемки зачастую необходим анализ траектории носителя и/или измерительных датчиков/антенн. К таким задачам можно отнести: анализ боковых уклонов от проектных маршрутов (общий анализ качества съемки), поиск срывов в измерениях (разрывов траектории), вывод высотных профилей.

В статье [11] рассмотрены возможные операции с маршрутами. В случае, если полет выполнен не в RouteNav, а траектория импортирована, например из результатов обработки геодезического приемника (каталоги координат точек измерений), то участки траектории могут привязываться к маршрутам автоматически, рис. 3.

Сам алгоритм присвоения выполняется перебором точек траектории с анализом расстояний до ближайшего маршрута и обратным проецированием по формулам (6), (7). При этом ставится дополнительное условие, что ближайшие несколько точек также должны относиться к данному маршруту (рекурсивная проверка в цикле). Уклоном же в данной ситуации будет являться расстояние от точки траектории до точки ее проецирования на маршрут по нормали к нему.

По выдерживанию маршрутов может быть вызвана утилита с автоматическим построением графиков и высотных профилей, см. рис. 3 (г), (ж), (з). Указанные инструменты позволяют локализовать и оценить проблемные участки в выдерживании маршрутов (в плане и по высоте), и учесть их при обработке геофизических измерений.

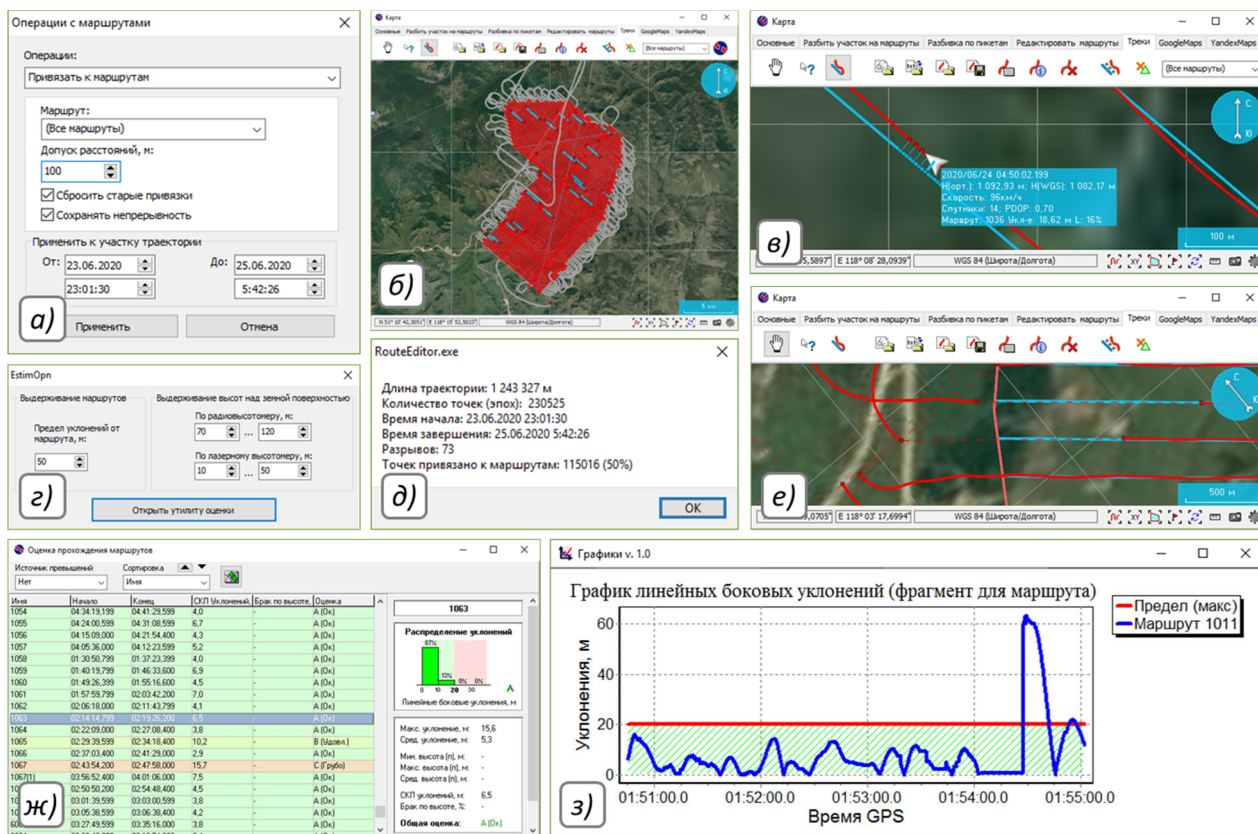


Рис. 3. Инструменты анализа траектории в RouteEditor:

а) настройки автоматического присвоения точек траектории маршрутам; б) результаты автоматического присвоения; в) вывод параметров эпохи с визуализацией уклонений; г) параметры вывода графиков анализа траектории; д) статистика по траектории; е) визуализация разрывов траектории; ж) утилита анализа качества полета; з) график линейных уклонений для выбранного маршрута

Анализ траекторий также позволяет обнаружить разрывы слежения спутников и, по характеристикам эпох до и после разрыва, понять (предположить) причины этих разрывов. На рисунке 3 (б), (в) приведен участок «Аленуйский» и траектория, полученная с навигационного приемника NV08C, находившегося на борту вертолета в процессе съемки.

Частота регистрации и вывода измерений в процессе полета задавалась на уровне 10 Гц, что, как оказалось, приводило к перегрузкам навигационного процессора при большом количестве наблюдаемых спутников (что можно было наблюдать по характеристикам эпох: до и после срыва количество принимаемых спутников находилось на уровне 12-13). Указанные выводы позволили снизить частоту вывода координат до 5 Гц и устранить срывы в дальнейшем.

Таким образом, анализ траекторий позволяет дополнительно прорабатывать вопросы навигационно-геодезического обеспечения полетов и находить причины сбоев или некачественных данных. Такой анализ проводится в ЗАО «Аэро-геофизическая разведка» при выполнении аэрогеофизических работ для повышения качества отчетного материала.

Задача осреднения траектории в точках остановок

Осреднение пунктов остановок – достаточно редкая и специфичная задача обработки траекторий. Такая задача, однако, имеет место при имитации режима «Stop-and-Go» при работе методом точного точечного позиционирования (Precise Point Positioning – PPP).

Метод позиционирования PPP широко представлен в научной периодике [12–14], где также зачастую предлагаются варианты его усовершенствования [15, 16].

Главное достоинство метода – возможность получения высокоточных координатно-высотных решений по ГНСС-измерениям без применения локальных базовых станций в непосредственной близости к пользователю. Применение PPP для геодезического обеспечения аэрогеофизических исследований рассматривалось в [17, 18], для наземной геофизики – в [19, 20].

Одним из недостатков данного метода является отсутствие режима «Stop-and-Go» в программах и сервисах, выполняющих обработку измерений, однако данный режим может быть имитирован из кинематики. В RouteEditor предложено два способа выделения пунктов остановок – полностью автоматический (если в поле приемник использовался перманентно в режиме кинематики) и по информации из файла сырых измерений в формате RINEX (если в процессе измерений остановки выделялись посредством контроллера), рис. 4.

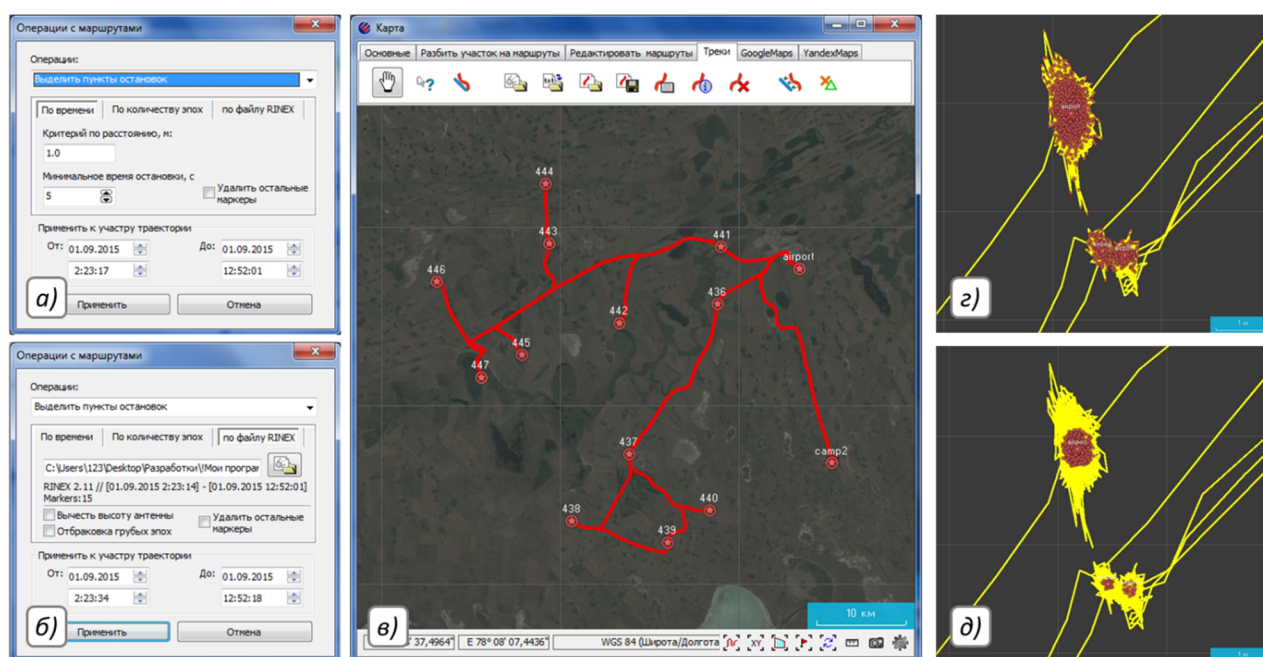


Рис. 4. Выделение пунктов остановок с осреднением координат:

а) настройки автоматизированного поиска остановок; б) импорт из файла измерений в формате RINEX; в) результат выделения пунктов остановок; г) использование фильтрации при формировании усредняемой выборки – фильтр 3σ , одна итерация; д) фильтр 3σ , 5 итераций

Первый способ подразумевает выделение выборки из n эпох, соответствующим размеру «окна» фильтра (например, 1 минута), для которых вычисляется среднеквадратическое отклонение σL от по формуле:

$$\sigma L = \sqrt{\frac{\sum_{i=j}^{j+n} ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2)}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=j}^{j+n} L_i^2}{n}}, \quad (8)$$

где j – индекс начала текущей выборки в массиве точек траектории;

$x_i, y_i, h_i, x_{i-1}, y_{i-1}, h_{i-1}$ – координаты смежных точек траектории.

Если σL не превышало заданного критерия σL_{max} , цикл продолжается, пока условие не перестанет выполняться. В результате получается выборка точки остановок. В случае, если между двумя смежными выборками одна или несколько эпох (ничтожно малый период времени), а среднее арифметическое расстояний между ними не превышает σL_{max} , выборки объединяются.

Осреднение координат выборок выполняется вычислением среднего арифметического, однако наличие в выборке точек с грубыми отклонениями от математического ожидания приводит к появлению ошибок осреднения, поэтому возможна дополнительная отбраковка по критерию 3σ , см. рис. 4 (г), (д).

Формула вычисления σ аналогична (8) с той поправкой, что отклонения вычисляются от среднеарифметических значений $\bar{x}, \bar{y}, \bar{h}$ в выборке:

$$\bar{L}_j = \frac{\sum_{i=j}^{j+n} (\Delta L_i)}{n}; \quad \Delta L = (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (h_i - \bar{h})^2;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=j}^{j+n} (L_i - \bar{L}_j)^2}{n}}, \quad (9)$$

Отбраковке подлежат измерения, для которых ΔL_i превышает утроенное значение σ .

Полученные результаты можно назвать «*Pseudo-Stop-And-Go*» PPP. В контексте полевой геофизики данный режим испытывался в рамках проведения гравиметрической съемки масштаба 1:200 000 на Ирменско-Кирзинской площади (Новосибирская область), выполнявшейся АО «СНИИГГиМС», и был признан пригодным для выполнения контроля результатов измерений относительным методом [20].

Задача редукции точек геофизических измерений

Гораздо более востребованным является решение другой задачи геодезического обеспечения – редукции измерений от координат антенны ГНСС-приемника к координатам измерительных датчиков/антенн. Главной причиной необходимости редукции является несовпадение измерительных центров, кото-

рого, в силу специфики геофизических исследований (например, при электромагнитном сканировании) зачастую технически невозможно избежать.

Реализация данной задачи подробно рассмотрена в статьях [21, 22], где в качестве инструмента также использовалась утилита RouteEditor. На рис. 5 приведен интерфейс настройки данной операции в программе, а также отображение результирующей редуцированной траектории.

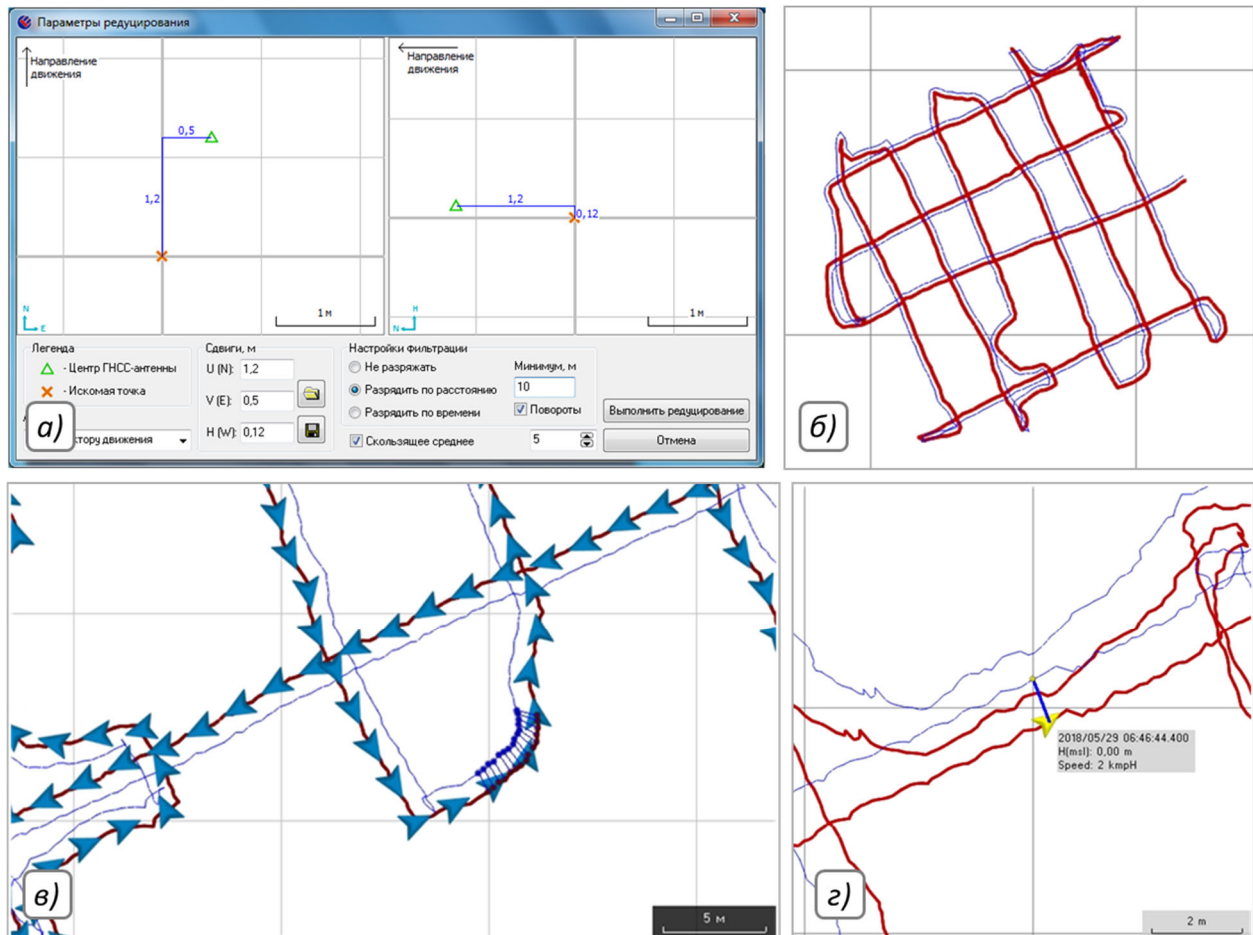


Рис. 5. Редуцирование траектории в RouteEditor:

а) настройка параметров редукции; б) результат редуцирования; в) опорные точки, выделенные для определения путевого угла; г) визуальное отображение полученного сдвига

Решение задачи редукции сводится к вводу поправок в исходные координаты:

$$\begin{aligned} X_{Ц} &= X_A + \Delta X; \\ Y_{Ц} &= Y_A + \Delta Y; \\ H_{Ц} &= H_A + \Delta H, \end{aligned} \quad (10)$$

где $X_{Ц}$, $Y_{Ц}$, $H_{Ц}$ – координаты и высоты точки центра измерительной антенны (геофизического датчика);

X_A, Y_A, H_A – координаты и высоты точек антенны ГНСС-приемника;

$\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ – поправки (смещения), вычисляемые в зависимости от метода редукции.

Если приемная аппаратура ГНСС и геофизические датчики находятся не едином жестком контуре, будет справедлива следующая строгая формула редукции:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta H \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где ψ, θ и φ – углы пространственной ориентации платформы курса, тангажа и крена (Yaw, Pitch, Roll);

U, V, W – линейные величины расстояний между измерительными антеннами геофизического датчика и ГНСС-аппаратуры вдоль оси контура, поперек и по высоте (при горизонтальном положении контура).

Величины U, V, W задаются в программе, а источниками углов могут являться смещения измерителя (при этом считается, что путевой угол равен курсу, а крен – нулевой), данные с датчиков ИНС (полностью все углы ориентации контура), данные со второй антенны ГНСС (в этом случае может быть вычислена угловая ориентация системы).

Таким образом, при расчете углов и поправок по ним на каждую (i -ю) эпоху для одной ГНСС-антенны будут применяться следующие допущения:

$$\operatorname{tg} \psi_i \approx \operatorname{tg} \text{ПУ}_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}; \quad \theta_i = 0; \quad \varphi_i = 0, \quad (12)$$

где ПУ_i – путевой угол на данную эпоху, принятый равным курсу.

В формуле (10) θ_i принят нулевым, так как этот угол, как правило, мал, а погрешность определения высот ГНСС-приемником по высоте выше, чем в плане [1, 2, 23].

Применение двух антенн ГНСС позволит решить задачу более точно, не прибегая к измерениям на смежные эпохи. При этом, если антенны ГНСС-приемников $a1$ и $a2$ расположить вдоль продольной оси измерительной платформы (антенна $a1$ – спереди, а $a2$ – сзади по направлению движения), то справедливо упрощение:

$$\tan \psi_i = \frac{y_{a2} - y_{a1}}{x_{a2} - x_{a1}} + \pi; \quad \sin \theta_i = \frac{h_{a1} - h_{a2}}{(x_{a2} - x_{a1})^2 + (y_{a2} - y_{a1})^2}; \quad \varphi_i = 0. \quad (13)$$

При вычислении угла курса ψ_i необходимо учитывать знак числителя и знаменателя для корректного определения четверти, к которой относится угол.

Если же антенны $a1$ и $a2$ расположить поперечно оси движения платформы (антенна $a1$ – слева, а $a2$ – справа по ходу движения), то справедливо:

$$\tan \psi_i = \frac{y_{a2} - y_{a1}}{x_{a2} - x_{a1}} - \pi/2; \quad \theta_i = 0; \quad \sin \varphi_i = \frac{h_{a1} - h_{a2}}{(x_{a2} - x_{a1})^2 + (y_{a2} - y_{a1})^2}. \quad (14)$$

Кроме того, может устанавливаться три антенны, при которых могут быть рассчитаны все три угла ориентации [24].

Точность всех трех методов требует дополнительной оценки. Во всех указанных случаях она будет зависеть от точности ГНСС-приемников и типа решения (в случае использования фазовой аппаратуры), а также параметров и точности их расстановки на контуре.

Применение углов ИНС и комбинации из двух и более ГНСС-антенн позволит получать углы пространственной ориентации на каждую конкретную эпоху. Применение измерений одного ГНСС приемника при невысоких скоростях движения, соизмеримых с точностью позиционирования аппаратурой, неизбежно приведет к неправильному определению путевого угла, и, как следствие, курса по формуле (10). Во избежание ошибок, вызванных данным фактором, программа позволяет выполнить фильтрацию точек, используемых для вычисления путевого угла, см. рис. 5 (в).

Предложенный алгоритм фильтрации включает в себя следующие шаги:

- опорные эпохи для определения ПУ выбираются на расстоянии не менее заданного пользователем максимума (например, 1 м);
- вычисляются ПУ на них по формуле (10);
- в случае превышения предельной разности значений ПУ смежных эпох (например, 30°) выполняется сгущение (набор дополнительных опорных эпох) между ними (от 1 до 10 итераций).

Указанный метод внедрен в работу ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» и АО «ГП Сибгеотех».

Выводы

Как можно увидеть из примеров, приведенных в статье, все задачи решаются применением методов элементарной алгебры и базовых тригонометрических функций. Несмотря на кажущуюся простоту задач, автоматизация их решения присутствует далеко не во всех ГИС, и может требовать от специалиста рутинных вычислений или написания собственных скриптов или программ.

Автоматическое решение подобных задач ускоряет производственный процесс и позволяет предупредить возможные ошибки персонала.

Статья подводит итог многолетнего усовершенствования программы. Авторы с радостью рассмотрят и другие виды задач, решение которых может быть добавлено в разрабатываемые программы семейства RouteNav.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геолого-разведочных работ [Текст]. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. – 106 с.
2. Прихода А.Г., Лапко А.П., Мальцев Г.И., Бунцев И.А. GPS-технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ : метод. рекомендации. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2008. – 274 с.
3. Прихода А.Г., Лапко А.П., Мальцев Г.И., Бунцев И.А. Спутниковое обеспечение сейсморазведочных работ : метод. рекомендации/ Науч. Ред. А.Г. Прихода – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2002 – 144 с., прил.4.
4. Глаголев, В. А. Спутниковое навигационно-геодезическое обеспечение геофизических измерений в движении [Текст] / В. А. Глаголев.– СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2003.– 104 с.
5. Мелеск, А. Х. Использование открытых геоинформационных систем при навигационно-геодезическом обеспечении сейсморазведочных работ методом глубинного сейсмического зондирования [Текст] / А. Х. Мелеск, С. О. Шевчук, Е. А. Кравченко // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 1. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 218-223.
6. Шевчук, С. О. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614500 / Российская Федерация / Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav [Текст] / С. О. Шевчук, С. В. Барсуков; заявитель и правообладатель Закрытое акционерное общество «Аэрогеофизическая разведка» (RU); дата поступления 09 янв. 2017 г.; дата регистрации 18 апр. 2017 г.
7. Шевчук, С.О. Навигационное сопровождение аэрогеофизических исследований с использованием программы RouteNav [Текст] / С.О. Шевчук, С.В. Барсуков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр., 17-21 апреля 2017 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 130 – 137.
8. Шевчук С.О. Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav // Вестник СГУГиТ. – 2017. – №4. (22). – С. 113-125.
9. ЗАО «Аэрогеофизическая разведка» [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.aerosurveys.ru>
10. Морозов, В. П. Курс сфероидической геодезии [Текст] Изд. 2, перераб. и доп., М.: Недра, 1979, 296 с.
11. Шевчук, С. О. Оценка выдерживания маршрутов при выполнении геофизических и аэрофотосъемочных работ [Текст] С. О. Шевчук, В. Н. Никитин, А. С. Сверкунов, С. В. Барсуков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 54 - 61.
12. Bisnath S., Gao Y. Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a Promising Future // GPS World. – 2009. – No. 4. – P. 43-50.
13. Chesagne O. One centimeter accuracy with PPP // Inside GNSS – 2012. – No 2. – P. 49-54.
14. Yu X., Gao J. Kinematic Precise Point Positioning Using Multi-Constellation Global Navigation Satellite System (GNSS) Observations // ISPRS Int. J. Geo-Inf. – 2017. – № 6. – 6.
15. Антонович, К.М. Совершенствование методики точного дифференциального позиционирования по результатам ГНСС-измерений (PPP) [Текст] / К. М. Антонович, Л. А. Липатников // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/С. – С. 44-47.
16. Bree R.J.P.V., Tiberius C.C.J.M. Real-time Single Frequency Precise Point Positioning: accuracy assessment. GPS Solutions. 2012. Vol. 16. Issue 2. P. 259–266.

17. Шевчук, С.О. Сравнение коммерческих программ постобработки измерений ГНСС в режиме кинематики для геодезического обеспечения аэрогеофизических работ [Текст] / С.О. Шевчук, Н.С. Косарев, К.М. Антонович // Вестник СГУГиТ. – 2016. – №3. – С. 79-102.
18. Шевчук С.О., Мелеск А.Х., Косарев Н.С. Исследования точности метода PPP для навигационно-геодезического обеспечения геофизических работ // Геопрофи. – 2016. – №3. – С. 10-15.
19. Шевчук, С.О. Применение измерений геодезической сети АБС НСО и метода PPP при геодезическом обеспечении геолого-геофизических работ [Текст] / С.О. Шевчук, Ю.М. Зюзин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. Т. 2. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – С. 85-92.
20. Шевчук, С. О. Контроль координат и высот пунктов гравиметрических наблюдений методом PPP [Текст] С. О. Шевчук, Н. С. Косарев, Ю. М. Зюзин, А. Х. Мелеск // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 18 - 27.
21. Шевчук, С. О. Редукция кинематических ГНСС-измерений [Текст] / С.О. Шевчук, В. Н. Никитин, О.Н. Лыско, В.М. Жидов Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2019. № 1 (48). – С. 63–72
22. Шевчук, С. О. Восстановление траектории движения центров измерительных антенн электромагнитной сканирующей системы [Текст] С. О. Шевчук, В. Н. Никитин, Н. С. Косарев, А. В. Куклин, К. В. Киселев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Междунар. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 44 - 53.
23. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии [Текст] в 2 т. Т.-2. Монография / К.М. Антонович; - М.: Картгеоцентр, 2006. – 360 с.: ил.
24. Шевчук, С.О. Алгоритм определения пространственных углов аэрогеофизической платформы [Текст] / С.О. Шевчук, Н.С. Косарев // Вестник СГГА – 2013. – Вып. (24). – С. 37–47.

© С. О. Шевчук, Е. С. Черемисина, В. Н. Никитин,
Ю. М. Зюзин, А. Х. Мелеск, С. В. Барсуков, 2021