

УДК 550.831.015:550.831.23

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МОРСКОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА “ЧЕКАН-АМ” И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

© 2020 г. Л.К. Железняк

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Опыт эксплуатации морского гравиметрического комплекса “Чекан-АМ” показал, что фактическая погрешность измерений в сложных погодных условиях проведения съемки может превышать расчетную. Это связано как с превышением допускаемых инерционных ускорений, так и с тем, что при обработке первичных данных эффект воздействия вектора инерционных ускорений учитывается не в полном объеме. Выполнено теоретическое обоснование и экспериментальное исследование источника погрешности. Принципиально известные и вносимые в измерения поправки уточняются в связи с тем, что при установке прибора плоскость вращения пробной массы развернута в азимуте относительно диаметральной плоскости судна; такая установка не является оптимальной.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием материалов площадной съемки. В этом случае инерциальные ускорения, регистрируемые в процессе съемки гравиметром и акселерометрами, используются как тестовые сигналы, вместо обычно задаваемых соответствующими стендами. Съемка выполнена по системе параллельных рабочих профилей и секущих их контрольных, что дало возможность получить ряд невязок в пунктах их пересечения. Изучение зависимости величины невязок от возмущающих ускорений позволило получить её аналитическое выражение и экспериментальное подтверждение. Для повышения точности следует вводить в результаты измерений поправки в соответствии с этим выражением.

Результат исследования – подтверждение того, что причиной появления дополнительной погрешности измерений является азимутальный разворот упругой системы гравиметрического датчика. Для ее исключения необходимо включить в программу обработки измерений вычисление поправки по показаниям каждой из кварцевых систем и акселерометров по обем осям качки. В этом случае существенно повышается точность измерений и увеличивается диапазон допускаемых погодных условий.

Ключевые слова: гравитационное поле Земли, морская гравиметрия, относительный гравиметр, обработка морских гравиметрических съемок.

Введение

Российский морской гравиметрический комплекс “Чекан-АМ” используется как отечественными [Бехтерев и др., 2019; Современные ..., 2017; Пешехонов и др., 2019], так и зарубежными [Petrovic, Barthelmes, Pflug, 2016; Lu et al., 2018, 2019] потребителями для съемок разного назначения. Принципы работы этого комплекса и методика обработки измерений обоснованы в ряде статей (см., например, [Краснов, Соколов, 2015] и др.). В настоящей статье анализируются некоторые особенности как работы комплекса “Чекан-АМ”, так и обработки получаемых результатов, которые связаны с орбитальным эффектом, обусловленным круговым движением судна-носителя в вертикальной плоскости и возникновением вращающегося вектора инерционных ускорений. С учетом опыта более ранних разработок и эксплуатации морских гравиметров с двойной упругой системой предполагалось, что погрешность от орбитальных ускорений не будет значимой. Все предшествующие поколения морских приборов, основанных на

использовании двойной упругой системы крутильного типа, предварительно исследовались на динамических стендах, в том числе и на орбитальных. По результатам стендовых исследований совершенствовались конструкция и технология производства упругой системы. Во времена перестройки большинство стендов было утрачено, и новые разрабатываемые образцы упругих систем таким испытаниям не подвергались. Считалось, что двойная упругая система достаточно хорошо компенсирует орбитальный эффект, который не выделялся на фоне других погрешностей. Однако в процессе эксплуатации комплекса “Чекан-АМ” возникла потребность проведения дополнительных исследований для учета действия орбитального эффекта на него, так как при неблагоприятных погодных условиях точность измерений не соответствовала ожидаемой [Железняк, 2010; Железняк, Соколов, Краснов, 2010; Соколов, Краснов, Железняк, 2019]. С одной стороны, это обусловлено разбросом постоянных времени двух кварцевых систем, а с другой, – тем, что ориентировка упругой системы при ее установке на судно-носитель не является оптимальной. Конструкция гравиметрического датчика такова, что вертикальная плоскость качания рычага кварцевых систем отклонена от диаметральной плоскости судна-носителя на 45° по азимуту. В этом случае орбитальный эффект имеет две составляющих – одна определяется ускорениями в килевой (диаметральной) плоскости качки, другая – в бортовой (миделя). При прочих равных условиях бортовая качка практически всегда больше килевой, в связи с чем требования идентичности параметров двух кварцевых систем должны быть выше. Влияние этого на точность измерений к настоящему времени исследовано недостаточно.

Постановка задачи

На испытательном стенде условия измерений имитируются заранее задаваемым режимом движения: величиной вертикальных и горизонтальных ускорений в плоскости движения рычагов упругой системы и сдвигом фаз между ними. Выполняется сравнение показаний гравиметра на работающем стенде и при его остановке.

В морских условиях возмущающие воздействия на гравиметр создаются случайными движениями судна при его качке, обусловленной погодными условиями. Эти движения синхронно и непрерывно регистрируются горизонтальными акселерометрами и гравиметром. При морских съемках нет заранее известной контрольной величины Δg , с которой можно было бы сравнить измерения, выполненные испытуемым гравиметром. В таком случае контрольное значение поля можно получить в движении путем многократного измерения Δg на одном контрольном пункте при пересечении его по разным галсам при разной качке. Однако этот, по сути, правильный способ представляется нерациональным и затратным, но сам принцип многократности может быть успешно применен, если для анализа реакции гравиметра на действие инерционных ускорений, обусловленных качкой судна, использовать материалы выполненных ранее площадных гравиметрических съемок на море. При наличии на исследуемом морском полигоне сети параллельных профилей, пересекаемых некоторым количеством контрольных (секущих), задача становится решаемой с использованием статистических вычислений, при которых результат тем лучше, чем больше точек пересечения.

Теоретическое обоснование

Результаты измерений на морском полигоне позволяют исследовать влияние ускорений по каждой из трех осей, а также их совместное влияние – орбитальный эффект. Полигон для исследований выбирался с учетом нескольких критериев – была

необходима большая площадь с секущими профилями для контроля и разнообразные погодные условия. Для анализа влияния динамических воздействий на точность измерений использовался пакет авторских программ [Железняк, 2017а,б, 2018], доработанных под конкретную задачу. Кроме штатной обработки вычислялись три поправки – поправка, учитывающая орбитальный эффект, поправка Гаррисона и поправка за турбулентность демпфирующей жидкости. Поскольку упругая система в комплексе “Чекан-АМ” отклонена в азимутальной плоскости на 45° (“нештатная” установка), то для вычисления орбитального эффекта необходимы формулы, учитывающие этот фактор.

Обычно для двойной упругой системы используется формула

$$\delta g_{or} = W_x (\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1)$$

в которой δg_{or} – орбитальный эффект; φ_1, φ_2 – углы отклонения рычагов крутильной системы от горизонта; W_x – горизонтальное ускорение в диаметральной плоскости [Плопов, 1967].

Рассчитав углы φ из простого соотношения $G/\Phi = g_r/\varphi$ в виде

$$\varphi = \frac{g_r \Phi}{G} = \frac{[b(m - m_0) + a(m - m_0)^2] \Phi}{G}, \quad (2)$$

где g_r – показания кварцевой системы гравиметра, мГал; Φ – полный угол закручивания упругой системы до горизонтального положения рычага, рад; G – сила тяжести, соответствующая углу Φ ; b, a – линейный и квадратичный коэффициенты градуировочной характеристики; m и m_0 – текущий и начальный отсчеты в единицах регистрации, находим орбитальный эффект δg_{or} :

$$\delta g_{or} = W_x \frac{[b(m - m_0) + a(m - m_0)^2] \Phi}{G}. \quad (3)$$

Хотя орбитальный эффект обусловлен одновременным действием вертикальных и горизонтальных ускорений, в формулах (1) и (3) присутствует только одно из них – горизонтальное, чему есть простое объяснение. Вертикальное ускорение влияет на изменение угла φ , определяемое по показаниям каждой из двух кварцевых систем гравиметра g_{r1} и g_{r2} . Таким образом, орбитальный эффект двойной упругой системы вычисляется как

$$\delta g_{or} = W_x \frac{(g_{r1} - g_{r2}) \Phi}{G}. \quad (4)$$

В статическом состоянии показания каждой из кварцевых систем, как правило, не совпадают, в результате чего образуется постоянная составляющая разности. Поскольку горизонтальное ускорение знакопеременно с нулевым математическим ожиданием, то для вычисления орбитального эффекта это не имеет значения. Так как коэффициенты градуировочных характеристик b двух систем различаются не более чем на 0.5 %, то при вычислении показаний g_r по отсчетам систем $(m - m_0)$ можно использовать единое значение b для обеих.

Для комплекса “Чекан-АМ” формула (4) приобретает вид

$$\delta g_{or} = \frac{(W_x \sin 45^\circ + W_y \cos 45^\circ) (g_{r1} - g_{r2}) \Phi}{G}, \quad (5)$$

где W_y – горизонтальное ускорение в плоскости миделя.

Гидродинамическая поправка δ_v и поправка Гаррисона $\delta_{x,y}$ для каждой из горизонтальных осей вычислялись по следующим формулам

$$\delta_v = k_v \dot{g}_r^2, \quad (6)$$

$$\delta_{x,y} = \frac{(W_x^2 + W_y^2)\Phi(p)}{g}, \tag{7}$$

в которых k_v – коэффициент гидродинамического сопротивления; $\Phi(p)$ – передаточная функция гироплатформы; \dot{g}_r – скорость изменения показаний.

Анализ экспериментальных материалов

Для анализа автором использовались результаты производственной съёмки, выполненной в Индийском океане. Схема площадных измерений включала 34 параллельных рабочих галса, пройденных с шагом 4 км (далее – галсы *A*), и четыре секущих (контрольных, далее – галсы *B*).

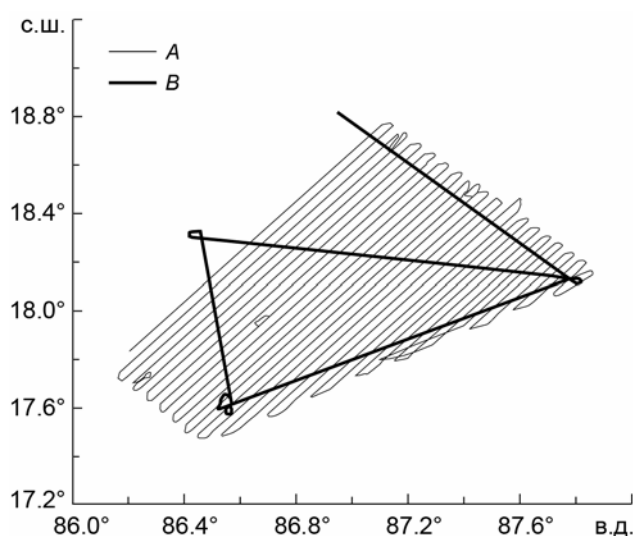


Рис. 1. Схема площадной съёмки: *A* – рабочие галсы; *B* – секущие (контрольные). Шаг между рабочими галсами – 4 км. На осях географические координаты

Fig. 1. Scheme of areal survey: *A* – working tacks; *B* – secants (control). The step between working tacks is 4 km. On the axes are geographic coordinates

При обработке экспериментальных данных использовались авторские программы SEAGRAVG [Железняк, 2017а] и SEAGRAVE [Железняк, 2017б], которые позволили получить результаты по профилям в принятом в Российской Федерации межведомственном формате МВФ05. Для нахождения и сравнения результатов измерений в пунктах пересечения профилей применялась программа SEAGRAVC [Железняк, 2018]; получаемые с ее помощью результаты выводятся в виде таблицы, в которую включаются все пункты пересечений профилей на исследуемом полигоне (табл. 1, фрагмент).

Таблица 1. Характеристика пунктов пересечения галсов

| № П.П. | Галс <i>A</i> | Галс <i>B</i> | T_A | T_B | φ | λ | δg | δH | $T_A - T_B$ |
|--------|---------------|---------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | G0718-01 | G0810-01 | 200.695868 | 223.644586 | 18.12240251 | 86.4904203 | 0.932 | – | –22.948718 |
| 97 | G0809-03 | G0811-01 | 222.509068 | 224.182510 | 18.12964051 | 87.77825343 | 1.155 | – | –1.673442 |

В первом столбце таблицы указываются номера всех пунктов пересечения (П.П., в нашем случае П.П. 1–97); во втором и третьем – имена файлов, содержащих данные по галсам A приведены во втором столбце, по галсам B – в третьем. Далее следуют: T_A и T_B – время пересечения по каждому из галсов в сутках с долями от начала года; φ и λ – географические координаты пункта пересечения; δg – разность измерений гравиметром; δH – разность измерений эхолотом (при наличии значения глубины в файле МВФ05); T_A-T_B – интервал времени между измерениями на пересекающихся галсах.

Представленные в таблице данные служат исходным материалом для анализа результатов съемки при оценке погрешности измерений по исследуемой площади в целом и по каждому галсу в отдельности. Получаемые по невязкам в пунктах пересечения галсов оценки погрешности также представляются в виде таблиц, содержащих детальный анализ работы гравиметра на разных галсах, то есть при разных условиях измерений (табл. 2, фрагмент).

Таблица 2. Оценка точности измерений на полигоне по невязкам в пунктах пересечения рабочих и секущих галсов

| № П.П. | Галс | Количество пересечений | Погрешности измерения Δg | |
|----------------------------------|----------|------------------------|----------------------------------|-----------|
| | | | Систематические | Случайные |
| 1 | G0718-01 | 3 | 1.040 | 1.194 |
| 27 | G0806-01 | 3 | -6.915 | 7.028 |
| 34 | G0809-03 | 3 | 0.501 | 0.675 |
| 35 | G0809-04 | 19 | -1.148 | 2.509 |
| 36 | G0810-01 | 14 | 0.879 | 1.120 |
| 37 | G0810-02 | 32 | -0.981 | 2.168 |
| 38 | G0811-01 | 32 | 0.399 | 1.740 |
| Полигон | | 94 | -0.290 | 1.991 |
| Погрешность единичного измерения | | | | 1.393 |

Упомянутая выше авторская программа обработки результатов измерений SEAGRAVG [Железняк, 2017а] была дополнена функциями вычисления всех динамических поправок с их выдачей по каждому галсу. Кроме представления результатов измерений в формате МВФ05, в отдельном файле записывались средние значения всех поправок, а также вертикальные ускорения от качки, вычисляемые по текущим показаниям гравиметра с использованием формулы

$$W_z = \tau \dot{g}_r = \frac{\tau(g_i - g_{i-1})}{\Delta t}, \quad (8)$$

в которой τ – постоянная времени упругой системы; g_i, g_{i-1} – два последовательных показания гравиметра; Δt – промежуток времени между ними.

Для вертикальных ускорений определялись среднеквадратические значения, а для остальных дополнительно вычисляемых величин – поправки Гаррисона, орбитального эффекта и поправки за турбулентность жидкости – находились средние значения на галсе по формуле текущего среднего, имеющей следующий вид:

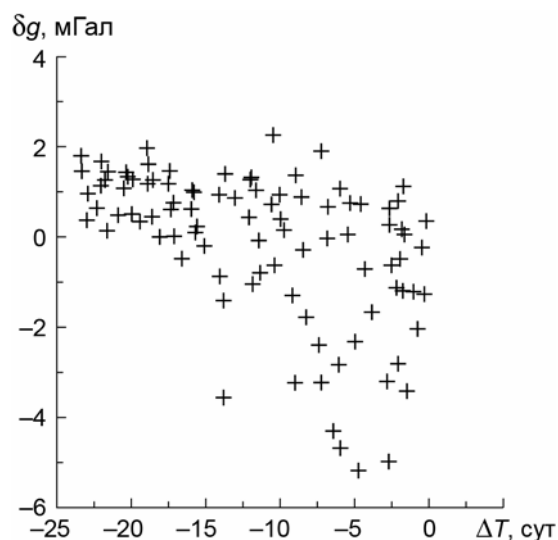
$$\Delta_{cp} = \Delta_{cp} \frac{n-1}{n} + \frac{\delta}{n}, \quad (9)$$

где n – текущий номер измерения; Δ_{cp} и δ – среднее и текущее значения соответствующих величин.

Полученные и обработанные описанным выше образом материалы съёмки позволяют анализировать работу гравиметра в зависимости от действия различных физических факторов. О правильном учете смещения нуля-пункта может дать представление график, представленный на рис. 2. Отметим при этом, что смещение нуля-пункта не просто выделить на фоне остальных, действующих одновременно, факторов – рис. 2 есть наглядный пример этому.

Рис. 2. Невязки измерений в пунктах пересечения профилей. На горизонтальной оси $\Delta T = T_A - T_B$

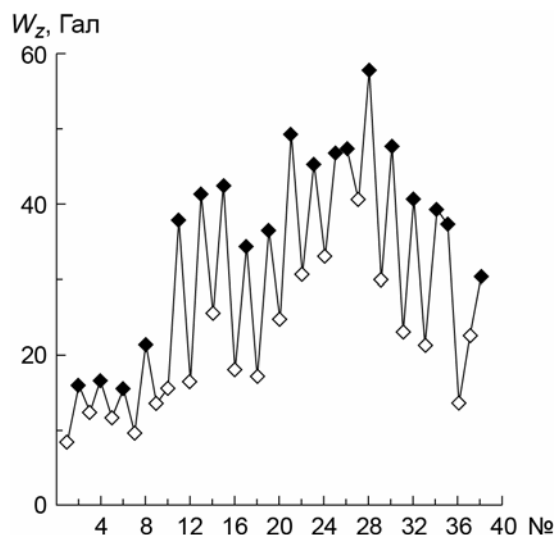
Fig. 2. Residuals of measurements at the intersection points of profiles. On the horizontal axis $\Delta T = T_A - T_B$



На рис. 3 представлены средние квадратические значения вертикальных возмущающих ускорений W_z на каждом из профилей.

Рис. 3. Средние квадратические значения вертикальных ускорений W_z по профилям при движении против морской волны (залитые ромбы) и по морской волне (ромбы без заливки). На горизонтальной оси – номера профилей

Fig. 3. Root mean square values of vertical accelerations W_z along the profiles when moving against the sea wave (filled rhombs) and along the sea wave (rhombs without filling). On the horizontal axis – profile numbers



Приводимый на рис. 3 график свидетельствует о проведении съёмки на полигоне при разных условиях – залитые ромбы соответствуют прохождению профилей в основном против морской волны; ромбы без заливки – прохождению по морской волне с противоположным эффектом орбитального движения. Само орбитальное движение направления не меняет, но на противоположном курсе меняется ориентация упругой системы на 180° и, как следствие, знак воздействующего на неё эффекта.

Одновременно с обработкой результатов измерений вычислялись орбитальные поправки, представленные на рис. 4.

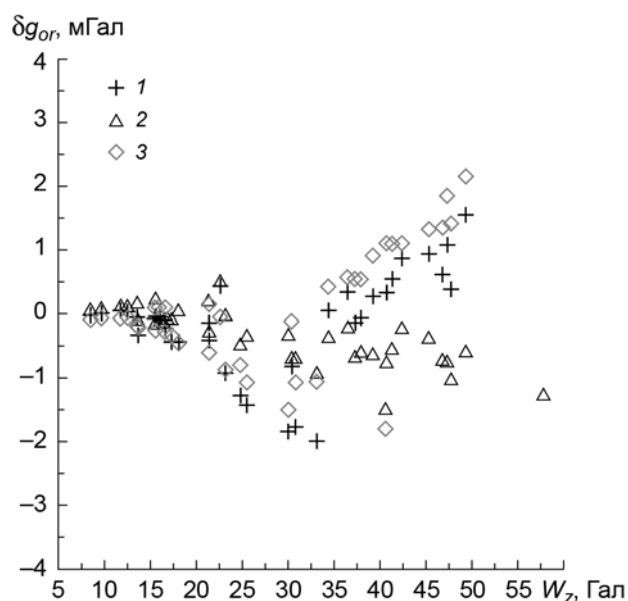


Рис. 4. Средние по профилю значения суммарного орбитального эффекта (1), орбитального эффекта в диаметральной плоскости (2) и в плоскости миделя (3)

Fig. 4. Average values of the total orbital effect on the profile (1), orbital effect in the center plane (2) and in the midship plane (3)

Анализируя рис. 4, можно видеть, что суммарная погрешность растет по модулю с увеличением качки, а её знак определяется направлением движения относительно волны. Кроме того, на погрешность измерений поперечные ускорения влияют больше, чем продольные. Знак погрешности меняется с изменением направления движения судна, что физически объяснимо.

При движении по волне или против волны меняется как величина возмущений, так и знак орбитального эффекта. Знак орбитального эффекта определяется знаком разности ($\varphi_1 - \varphi_2$), зависящим, в свою очередь, от соотношения произведений $b_1\tau_1$ и $b_2\tau_2$, а также направлением разворота упругой системы в азимутальной плоскости и направлением орбитального движения по отношению к ходу судна. Из приведенной выше формулы (3) знак вычисляемого эффекта для данного конкретного прибора и условий измерений не очевиден, и по этой причине знак вводимой поправки определялся экспериментально.

Измерения обрабатывались девять раз – сначала это делалось без введения поправок, затем с разными вариантами вводимых поправок. Для каждого варианта по описанной выше методике проводилась оценка погрешностей измерений путем обработки невязок в точках пересечения профилей. Приводимая ниже табл. 3 содержит итоговые результаты оценок статистических характеристик для всех девяти вариантов. Кроме оценок по полигону в целом, в таблице показаны оценки для галса G0806-01, на котором были отмечены экстремальные “отскоки” (выделены утолщенным шрифтом).

Первая строка табл. 3 содержит результаты, полученные без введения поправок; далее для разных вариантов вводимых поправок используются следующие обозначения: δg_{or} – суммарная орбитальная поправка; $\delta g_{or,x}$ – поправка за орбитальный эффект по оси x ; $\delta g_{or,y}$ – поправка за орбитальный эффект по оси y ; δ_v – гидродинамическая поправка; δ_{xy} – поправка Гаррисона.

Логично считать, что при правильном введении орбитальной поправки среднеквадратическое значение невязки в пунктах пересечения будет минимальным. Из приведенных данных следует, что таким вариантом является третий (выделен в табл. 3 заливкой), когда из результата измерений вычитается поправка в виде суммы составляющих по обеим осям. Минимальная среднеквадратическая погрешность получена при вычитании суммы обеих составляющих по осям x и y .

Таблица 3. Статистические характеристики разностей на пересечениях профилей с учетом и без учета поправок

| № | Варианты вводимых поправок | Полигон Галс | Значения невязок | | | |
|---|---|---------------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | | | Первичное | | После уравнивания | |
| | | | Среднее | Среднеквадратичное | Среднее | Среднеквадратичное |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Без поправок | Полигон | -0.290 | 1.393 | 0.000 | 0.441 |
| | | Галс G0806-01 | -6.915 | 7.028 | 0.287 | 0.643 |
| 2 | $(\delta g_{or.x} + \delta g_{or.y})$ | Полигон | -0.238 | 2.143 | 0.000 | 0.529 |
| | | Галс G0806-01 | -10.070 | 10.220 | 0.342 | 0.691 |
| 3 | $-(\delta g_{or.x} + \delta g_{or.y})$ | Полигон | -0.337 | 0.831 | 0.001 | 0.384 |
| | | Галс G0806-01 | -3.760 | 3.869 | 0.228 | 0.616 |
| 4 | $-(\delta g_{or.x} - \delta g_{or.y})$ | Полигон | -0.526 | 1.453 | 0.000 | 0.493 |
| | | Галс G0806-01 | -6.237 | 6.415 | 0.185 | 0.593 |
| 5 | $-(\delta g_{or.x} - \delta g_{or.y})$ | Полигон | -0.051 | 1.899 | -0.001 | 0.487 |
| | | Галс G0806-01 | -7.592 | 7.732 | 0.385 | 0.719 |
| 6 | $\delta_{xy}, \delta_v, -\delta g_{or}$ | Полигон | -1.096 | 0.560 | -0.000 | 0.217 |
| | | Галс G0806-01 | -3.589 | 3.683 | 0.072 | 0.777 |
| 7 | $\delta_{xy}, \delta_v, -G_{or}$ | Полигон | -1.132 | 0.544 | 0.000 | 0.220 |
| | | Галс G0806-01 | -3.679 | 3.774 | 0.068 | 0.802 |
| 8 | $\delta_{xy}, \delta_v, -\delta g_{or}$ | Полигон | -1.141 | 0.543 | -0.001 | 0.222 |
| | | Галс G0806-01 | -3.701 | 3.790 | 0.102 | 0.807 |
| 9 | δ_{xy}, δ_v | Полигон | -1.095 | 1.238 | -0.001 | 0.270 |
| | | Галс G0806-01 | -6.833 | 6.935 | 0.102 | 0.791 |

Вывод о правильном выборе поправки убедительно подтверждается на одном из профилей, который при высоком (>40 Гал) фоне помех характеризуется большой величиной погрешности. Изменение силы тяжести на этом профиле и величина орбитального эффекта показаны на рис. 5.

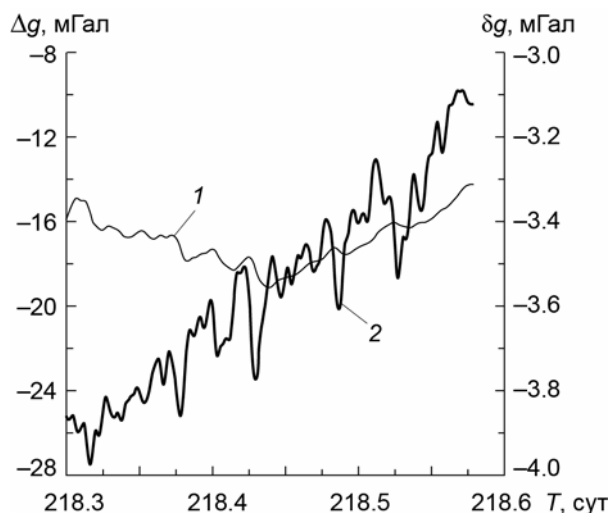


Рис. 5. Изменение поля на профиле (1, левая ось) и орбитальный эффект (2, правая ось)

Fig. 5. Changes of the field on the profile (1, left axis) and orbital effect (2, right axis)

Орбитальный эффект и постоянные составляющие невязки в пунктах пересечения для всех профилей до и после введения поправки в измерения представлены на рис. 6. Визуально уровень невязок на профилях не меняется, изменяется только величина колебаний относительно некоторого уровня.

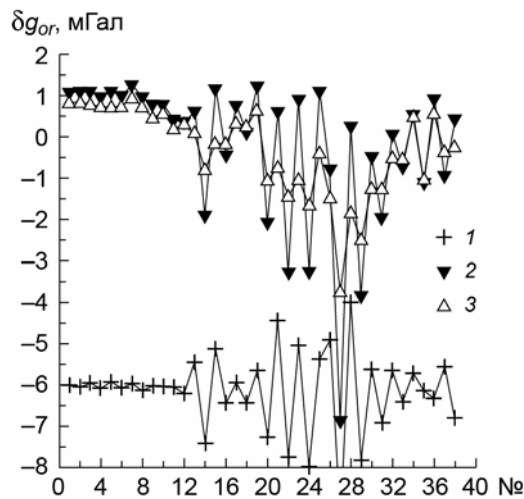


Рис. 6. Орбитальный эффект (1) и постоянная составляющая невязки в пунктах пересечения профилей до (2) и после (3) введения поправки

Fig. 6. Orbital effect (1) and the constant component of the residual at the intersection points of the profiles before (2) and after (3) introducing the correction

Разность уровней, вычисленная по данным табл. 3, составила -0.047 мГал, а полученная прямым суммированием величины орбитального эффекта – -0.060 мГал, т.е. уровни практически совпадают. Физически это объяснимо, так как при смене курса знак орбитального эффекта меняется и происходит его взаимная компенсация. При большой статистике сумма поправок должна стремиться к нулю.

На следующем этапе оценивалось влияние других составляющих динамических погрешностей δ_w и δ_v . Строки 6, 7, 8 в табл. 3 отличаются друг от друга значениями коэффициента гидродинамического сопротивления в формуле (6): в строке 6 – $k_v=1.5 \cdot 10^{-6}$ с²/мГал, в строке 7 – $k_v=1.2 \cdot 10^{-6}$ с²/мГал, в строке 8 – $k_v=1.0 \cdot 10^{-6}$ с²/мГал. В работе [Соколов, Краснов, Железняк, 2019] на основании стендовых испытаний группы приборов коэффициент k_v был принят равным 10^{-6} с²/мГал. С учетом представленных в табл. 3 результатов в дальнейшем следует использовать $k_v=1.2 \cdot 10^{-6}$ с²/мГал.

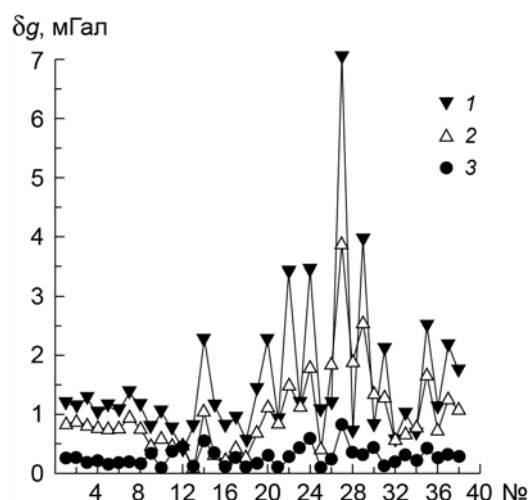
При учете влияния всех динамических погрешностей изменяется уровень съёмки за счёт двух поправок δ_w и δ_v , средние значения которых по полигону составляют 0.100 и 0.259 мГал соответственно. Естественно, что они вводятся непрерывно в зависимости от этих ускорений. В итоге остаются случайные погрешности в широком диапазоне частот, которые невозможно учесть заранее. Такие погрешности оцениваются по невязкам при площадных съёмках, предполагающих измерения на секущих профилях.

Полученные на пересечениях невязки используются для последующего уравнивания путем компенсации общей разности измерений между покрытиями, а также компенсации среднего отклонения измерений на каждом из профилей в отдельности для обоих покрытий. Такое уравнивание выполнялось с использованием программы SEAGRAVC для всех вариантов обработки результатов съёмки. Затем для каждого из вариантов оценивались погрешности по тем же правилам. Результаты оценки представлены в столбцах 6, 7 приводимой выше табл. 3. Во всех вариантах среднее значение невязки на пересечениях равно нулю, что вытекает из принципа введения поправок. Однако общий уровень съёмки изменяется на половину разности между покрытиями.

Введение профильных поправок уменьшает случайную погрешность полигона без изменения его уровня. Анализ табл. 3 подтверждает очевидный факт – лучший результат по точности измерений получается при уравнивании, которое должно проводиться после введения всех известных поправок. Среднеквадратичные значения невязок на профилях до введения поправок, после их введения и после уравнивания показаны на рис. 7.

Рис. 7. Средние квадратические значения невязок на профилях до введения поправок (1), после их введения (2) и после выполнения уравнивания (3)

Fig. 7. Root mean square values of residuals on the profiles before the introduction of corrections (1), after their introduction (2) and after the adjustment (3)



Заключение

Проведенные исследования показали, что влияние орбитального эффекта на результаты измерений морским гравиметрическим комплексом “Чекан-АМ” необходимо учитывать особым образом, принимая в расчет особенности конструкции и установки на судне, следствием которых является его повышенная чувствительность к инерционным помехам.

Для учета влияния орбитального эффекта на результаты гравиметрических измерений необходимо включить в программу их обработки несколько операторов, читающих данные акселерометров и реализующих формулу (5) с учетом демпфирующих свойств упругой системы на этапе формирования сигнала для фильтрации.

Финансирование

Исследование выполнено по государственному заданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00524.

Литература

- Бехтерев С.В., Дробышев М.Н., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Соловьев В.Н.* Погрешности моделей гравитационного поля Земли в зависимости от морфологии рельефа дна океана // *Физика Земли*. 2019. № 5. С.118–122.
- Железняк Л.К.* Точность измерений гравиметрическим комплексом “Чекан-АМ” в морских условиях // *Физика Земли*. 2010. № 11. С.95–98.
- Железняк Л.К.* Программа обработки измерений российскими морскими гравиметрическими комплексами по первичным файлам SEAGRAVG. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017662401. 2017а. https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
- Железняк Л.К.* Программа вычисления поправки Этвеша при измерениях силы тяжести на море SEAGRAVE. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017662632. 2017б. https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
- Железняк Л.К.* Программа оценки точности площадной гравиметрической съёмки на море и её уравнивание SEAGRAVC. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018619400. 2018. https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

- Железняк Л.К., Краснов А.А., Соколов А.И. Влияние инерционных ускорений на точность гравиметра “Чекан-АМ” // Физика Земли. 2010. № 7. С.29–32.
- Краснов А.А., Соколов А.В. Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра “Чекан АМ” // Гироскопия и навигация. 2015. № 2. С.118–131.
- Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А. Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 4 (107). С.162–180.
- Попов Е.И. Определение силы тяжести на подвижном основании с помощью сильно демпфированных гравиметров. М.: Наука, 1967. 218 с.
- Соколов А.И., Краснов А.А., Железняк Л.К. Повышение точности аэроморского гравиметра // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 2. С.70–81.
- Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Ред. В.Г. Пешехонов. СПб.: “Концерн “Центральный научно-исследовательский институт “Электроприбор”, 2017. 390 с.
- Petrovic S., Barthelmes F., Pflug H. Airborne and Shipborne Gravimetry at GFZ with Emphasis on the GEOHALO Project // IAG 150 Years. Springer, Cham, 2015. V. 143. P.313–322.
- Lu B., Barthelmes F., Li M., Förste C., Sinem Ince E., Petrovic S., Flechtner F., Schwabe J., Luo Z., Zhong B., He K. Shipborne gravimetry in the Baltic Sea: data processing strategies, crucial findings and preliminary geoid determination tests // Journal of Geodesy. 2019. V. 93, N 7. P.1059–1071.
- Lu B., Sinem Ince E., Barthelmes F., Förste C., Petrovic S., Li M., Pflug H., Flechtner F. Shipborne gravimetry data processing: case studies in the Baltic Sea and North Sea using GNSS-derived kinematic vertical accelerations // EGUGA. 2018. P.12991.

Сведения об авторе

ЖЕЛЕЗНЯК Леонид Кириллович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(496) 256-13-07. E-mail: zlkledovo@yandex.ru

FEATURES OF THE WORK AND PROCESSING OF THE RESULTS OF THE MARINE GRAVIMETRIC COMPLEX “CHEKAN-AM”

L.K. Zheleznyak

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The operating experience of the Chekan-AM marine gravimetric complex showed that the actual measurement error in difficult weather conditions of the survey can exceed the calculated one. This is due both to the excess of the permissible inertial accelerations and to the fact that when processing the primary data, the effect of the influence of vector of inertial accelerations is not fully taken into account. Theoretical substantiation and experimental study of the source of error was carried out. The fundamentally known corrections made to the measurements are refined due to the fact that when the device is installed the plane of rotation of the proof mass is extended in azimuth relative to the center plane of the vessel. This setting is not optimal.

Experimental studies were carried out using areal survey materials. In this case, the inertial accelerations recorded by the gravimeter and accelerometers during the survey are used as test signals, instead of usually set by the corresponding stands. The survey was performed using a system of parallel working profiles and secant control lines, which allows obtaining a number of residuals at the intersection points. The study of the dependence of the magnitude of the residuals on the disturbing accelerations made it possible to obtain its analytical expression and experimental confirmation. To improve the accuracy, corrections should be introduced into the measurement results in accordance with this expression.

The result of the study is confirmation that the cause of the additional measurement error is the azimuthal turn of the elastic system of the gravimetric sensor. To eliminate it, it is necessary to include in the measurement processing program the calculation of the correction according to the readings of each of the quartz systems and accelerometers along both roll axes. In this case, the measurement accuracy is significantly increased and the range of permissible weather conditions increases.

Keywords: Earth’s gravitational field, marine gravimetry, relative gravimeter, processing of marine gravimetric surveys.

References

- Bekhterev S.V., Drobyshev M.N., Zheleznyak L.K., Koneshov V.N., Mikhailov P.S., Solovyev V.N., Errors of earth gravity models as depending on seafloor morphology, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019, vol. 55, no. 5, pp. 806-810, DOI: 10.31857/S0002-333720195118-122
- Krasnov A.A., Sokolov A.V., Sovremenniy kompleks programmno-matematicheskogo obespecheniya mobil'nogo gravimetra “Чекан АМ”, *Giroskopiya i navigatsiya* (Gyroscopy and navigation), 2015, no. 2, pp. 118-131. [in Russian].
- Lu B., Barthelmes F., Li M., Förste C., Sinem Ince E., Petrovic S., Flechtner F., Schwabe J., Luo Z., Zhong B., He K., Shipborne gravimetry in the Baltic Sea: data processing strategies, crucial findings and preliminary geoid determination tests, *Journal of Geodesy*, 2019, vol. 93, no. 7, pp. 1059-1071.
- Lu B., Sinem Ince E., Barthelmes F., Förste C., Petrovic S., Li M., Pflug H., Flechtner F., Shipborne gravimetry data processing: case studies in the Baltic Sea and North Sea using GNSS-derived kinematic vertical accelerations, *EGUGA*, 2018, p. 12991.
- Peshkxonov V.G., Sokolov A.V., Zheleznyak L.K., Bereza A.D., Krasnov A.A., Contribution of navigation technologies to mobile gravimeter development, *Giroskopiya i navigatsiya* (Gyroscopy and navigation), 2019, vol. 27, no. 4 (107), pp. 162-180. [in Russian].
- Petrovic S., Barthelmes F., Pflug H., Airborne and Shipborne Gravimetry at GFZ with Emphasis on the GEOHALO Project, *IAG 150 Years, Springer, Cham*, 2015, vol. 143, pp. 313-322.
- Popov E.I., *Opredelenie sily tyazhesti na podvizhnom osnovanii* (The definition of gravity on the movable platform), Moscow: Nauka, 1967, 218 p. [in Russian].
- Sokolov A.I., Krasnov A.A., Zheleznyak L.K., Povyshenie tochnosti aeromorskogo gravimetra, *Giroskopiya i navigatsiya* (Gyroscopy and navigation), 2019, vol. 27, no. 2, pp.70-81. [in Russian].
- Sovremennye metody i sredstva izmereniya parametrov gravitacionnogo polya Zemli* (Modern methods and tools for measuring of parameters of the Earth's gravitational field), St. Petersburg: CNII “Elektroprigor”, 2017, 390 p. [in Russian].
- Zheleznyak L.K., Programma obrabotki izmerenij rossijskimi morskimi gravimetricheskimi kompleksami po pervichnym fajlam SEAGRAVG, *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlya EVM № 2017662401*, 2017a, https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. [in Russian].
- Zheleznyak L.K., Programma vychisleniya popravki Etvesha pri izmereniyah sily tyazhesti na more SEAGRAVE, *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlya EVM № 2017662632*, 2017b, https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. [in Russian].
- Zheleznyak L.K., Programma ocenki tochnosti ploschadnoj gravimetricheskoy s"yomki na more i eyo uravni-vanie SEAGRAVC, *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programm dlya EVM № 2018619400*, 2018, https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. [in Russian].
- Zheleznyak L.K., The accuracy of measurements by the Chekan-AM gravity system at sea, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 11, pp. 1000-1003.
- Zheleznyak L.K., Krasnov A.A., Sokolov A.V., Effect of the inertial accelerations on the accuracy of the Chekan-AM gravimeter, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2010, vol. 46, no. 7, pp. 580-583.