

В. И. СОМОВ, В. Р. СИДОРЕНКО

О ВЕКОВЫХ ВАРИАЦИЯХ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Впервые в СССР значительные расхождения между повторными измерениями силы тяжести зафиксировал в 30-х годах на Кавказе М. С. Абакелия [1]. Для выявления возможности существования временных вариаций силы тяжести (δg) Н. Н. Парийский [10] осуществил связь гравиметрического пункта Тбилиси с рядом пунктов европейской части СССР и Потсдамом. Так как сила тяжести в Тбилиси за период (1903—1909)—(1931—1936) гг. практически оставалась неизменной, то казалось, что было доказано отсутствие изменений силы тяжести вообще.

В конце XIX—начале XX ст. изменения силы тяжести во времени были замечены на основном гравиметрическом пункте США в Вашингтоне [3, 25]. Впервые абсолютные значения силы тяжести здесь были определены в 1875—1876 гг. Повторные связи с европейскими гравиметрическими станциями и Потсдамом выполнялись в 1900, 1928, 1934—1935 и 1959 гг. После тщательного анализа всех измерений исследователями был сделан вывод о том, что выявляемые различия g следует объяснить недостаточным уровнем точности измерений в конце прошлого и начале нынешнего столетия.

Работы по созданию сети опорных гравиметрических пунктов, проводимые в СССР в 1950—1954 гг., и повторные определения значений силы тяжести в 1961 г. на идентичных пунктах показали относительное постоянство гравитационного поля [4].

Кроме вышеперечисленных крупных исследований, были и другие попытки измерить вековые вариации силы тяжести. Все они заканчивались неудачами, что объяснялось либо недостаточной точностью наблюдений, либо тем, что вариации явля-

лись следствием перемещений глубинного вещества в жерлах вулканов [2, 30]. Этим отвергалось предположение о существовании изменений силы тяжести во времени.

Однако обнаруженное в 1963 г. увеличение силы тяжести на 0,6 мгл в пунктах Рига и Ленинград снова остро поставило вопрос о существовании временных вариаций силы тяжести. С 60-х годов в СССР начинается проведение детальных исследований на больших территориях с целью выявления вековых изменений силы тяжести.

Прежде всего следует указать на результаты сопоставления материалов наблюдений 1955 и 1967 гг. Так как приращения силы тяжести на участке Рига—Петропавловск-Камчатский достигали +0,10 мгл, а для южных пунктов (Тбилиси, Ашхабад, Душанбе, Алма-Ата и Болхаш) — +0,05 мгл, это позволило Ю. Д. Буланже [5] сделать вывод: «Если поле силы тяжести меняется линейно, то его изменения за указанный период могли происходить со скоростью +0,012 мгл/год».

В 1969—1971 гг. было проведено сравнение первоначальных и повторных измерений, проведенных с 1951 по 1969 гг. на обширных площадях в различных регионах нашей страны [26, 27, 28]. Этими исследованиями были зафиксированы расхождения силы тяжести, которые хорошо коррелируют с особенностями геологического строения [22].

В связи с тем, что для отдельных районов СССР использовалась не только государственная, но и местная опорная сеть, при дальнейшем изучении вариаций силы тяжести мы ограничимся только территорией Украины, где материал гравиметрических наблюдений наиболее качественный.

Начальные измерения 1962 г. на исследуемой территории характеризуются средней квадратической ошибкой $\pm 0,06$ мгл. Точность наблюдений 1969 г., выполненных при содействии Управления геофизических работ Министерства геологии СССР, оценивается величиной $\pm 0,05$ мгл. По данным, полученным на 36 пунктах опорной сети, была составлена схема вековых изменений силы тяжести с сечением изолиний δg через 0,2 мгл. В качестве исходного пункта вычисления δg принят пункт, расположенный почти в центре исследуемой территории (рис. 1) [27].

Достоверность выявленных изменений силы тяжести обоснована:

отсутствием в расхождениях измерений влияния систематических ошибок метрического характера;

большой вероятностью, связи выявляемых расхождений с тектоническими элементами.

Так как средняя квадратическая ошибка разности измеренных приращений силы тяжести для 1962—1969 гг. составляет $\pm 0,08$ мгл (m), то для 24 пунктов δg превышает величину $2m$, а для 18 — равно или более $3m$. Последние данные убедительно свидетельствуют о том, что выявляемые расхождения зна-

чений силы тяжести не являются инструментальными ошибками наблюдений.

Однако схема (рис. 1) не полностью освещает изменения вариаций силы тяжести на территории республики. Поэтому нами проведена их детализация путем уменьшения сечений изолиний δg до $\pm 0,05$ мгл (рис. 2), что позволило выделить ряд аномальных областей максимального возрастания δg . В восточной части Украины — это район Токмака, Днепропетров-

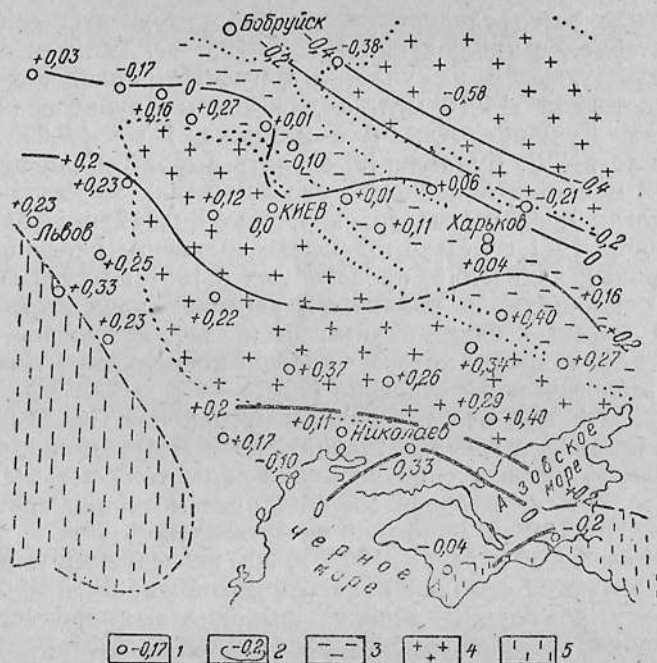
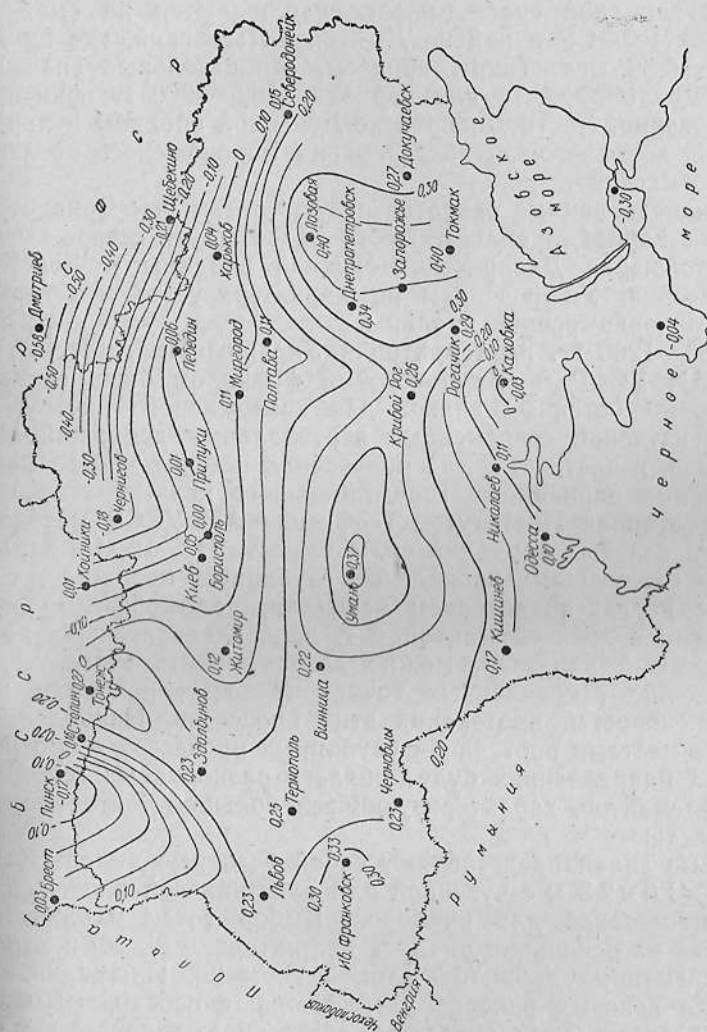


Рис. 1. Схема вековых изменений силы тяжести за период 1962—1969 гг. [28]:

1 — точки повторных наблюдений и величины вековых изменений, мгл; 2 — изолинии δg , мгл; 3 — области впадин; 4 — области выступов; 5 — область мезозойской складчатости.

ска и Лозовой; в центральной части — район Умани; в северо-западной части — район Тонежа и в западной — район Ивано-Франковска. Значения δg здесь достигают $+(0,30-0,40)$ мгл. Все максимумы δg приурочены к Украинскому кристаллическому щиту, его склонам и Донецкой складчатой области. Указанные аномальные области значительных положительных значений δg разделены зонами относительных понижений вековых вариаций силы тяжести (на $0,10-0,15$ мгл).

На рис. 2 показана зона положительных значений вариаций силы тяжести, протягивающаяся с востока на запад вдоль всей территории республики (оконтурена изолинией $+0,10$ мгл). Та-



кая же полоса увеличения δg намечается и в субмеридиональном направлении по линии Винница—Тонеж. Она разделяет область отрицательных значений вариаций силы тяжести, фиксируемую на севере Украины. Это район Пинска, где δg равно $-0,17$ мгл, и районы Чернигова (δg равно $-0,18$ мгл) и Шебекино (δg равно $-0,21$ мгл). Наибольшие отрицательные значения вариаций силы тяжести наблюдаются на смежной территории РСФСР в районе Дмитриев-Льговский, где δg достигает $-0,58$ мгл. Таким образом, отрицательные значения вариаций силы тяжести для периода 1962—1969 гг. фиксируются в северной части Днепровско-Донецкой впадины и характерны для всего юго-западного склона Воронежского кристаллического массива.

Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что зона отрицательных вариаций силы тяжести захватывает северо-западное продолжение Днепровско-Донецкой впадины и Белорусского массива. Уменьшением δg характеризуется и северное крыло Причерноморской впадины.

В 1963—1966 гг. на территории Украины Институтом геофизики АН УССР и его Львовским филиалом была создана сеть вековых бетонных знаков для комплексного инструментального изучения современных вертикальных движений земной коры и, в частности, для проведения наблюдений за непериодическими вариациями гравитационного поля.

Разработанная Институтом геофизики АН УССР методика измерений вековых вариаций силы тяжести [11, 12, 13] заключалась в следующем: проявление глубинных процессов, связанных с перераспределением вещества, полиморфными превращениями в верхней мантии и т. д. и, следовательно, носящих объемный характер, можно зафиксировать минимум на двух надежно закрепленных точках (вековых реперах), как разность скоростей протекания этих процессов. Наиболее вероятными местами протекания глубинных процессов в противоположных направлениях будут области разнородных геоструктурных элементов, характеризующиеся большой тектонической подвижностью.

Вековые знаки представляют собой бетонные пилоны сечением $1,0 \times 1,0 \times 2,5$ м с чугунной или алюминиевой плитой, служащей подставкой для приборов. Выбор точек наблюдения произведен на основании анализа неотектоники [6, 20] и характера современных движений земной коры [9]. Площадки для заложения вековых реперов удовлетворяют необходимым инженерно-геологическим условиям, обеспечивают локальное постоянство геофизических полей и характеризуются отсутствием промышленных помех.

Так как деформации грунтов, обусловленные влиянием внешних (нетектонических) факторов могут сказываться на высотном положении вековых реперов, то в 1966—1971 гг. нами проведено опытное определение устойчивости сети знаков на

территории западных областей УССР [21]. С этой целью построена местная сеть из трех знаков, два из которых закреплены на склоне, а третий — в специально выбранной штольне на глубине 51 м от поверхности и на расстоянии 95 м от входа. Последний знак, находящийся в условиях постоянной температуры и влажности, является эталоном для суждения об устойчивости вековых реперов, расположенных на дневной поверхности.

Наиболее опасным фактором, оказывающим систематическое влияние на устойчивость знаков, являются силы морозного пучения грунтов. Поэтому расчет конструкции знаков производился нами по формуле [24]

$$\frac{rS_1 + Q}{pS_2} \geq k,$$

где r — удельная величина сил сопротивления выпучиванию, которая, согласно строительным нормам, равна $0,20 \text{ кг/см}^2$; S_1 — поверхность знака, расположенная в незамерзающем слое в см^2 ; Q — вес знака; p — удельная величина сил морозного пучения, которую можно принять в случае расположения верхней части знака на уровне поверхности Земли — $0,50 \text{ кг/см}^2$; S_2 — поверхность смерзания стенок знака с грунтом; k — коэффициент запаса устойчивости, принимаемый равным единице при закладке знаков в условиях с ненарушенным снежным покровом.

Проведенные исследования [22] дали основание считать, что построенная сеть вековых реперов может быть использована для постановки геодезических и геофизических наблюдений за динамическими характеристиками земной коры.

В условиях Украины геоструктурными элементами с различным возрастом, а значит, и с контрастным изменением гравитационного поля во времени является докембрийский Украинский щит, палеозойский Днепровско-Донецкий авлакоген, эпигерцинская Скифская плита и альпийские сооружения Карпат и Крыма. Поэтому наиболее благоприятными для постановки наблюдений были выбраны профили Харьков—Київ—Львов—Ужгород [16] и Запорожье—Винница—Львов [3, 14], а также Карпатский [23] и Крымский геодинамический полигоны [15].

Первые гравиметрические наблюдения на профиле Харьков—Київ—Львов были проведены в 1965 г. Точность измерений составляла $\pm 0,04 \text{ мгл}$. Повторные наблюдения 1966 г. характеризуются средней квадратической ошибкой $\pm 0,02 \text{ мгл}$. В 1968 г. пятью гравиметрами была выполнена третья серия наблюдений. Оценка точности в последнем случае была проведена по доверительной вероятности наблюдаемого приращения силы тяжести по каждой связи [7]. Доверительный интервал равен $\pm 0,05 \text{ мгл}$.

В 1966, 1968, 1970 гг. Институтом геофизики АН УССР были выполнены три серии наблюдений δg на профиле Запорожье—Львов. Большая часть измерений 1968 г. имеет достоверную вероятность 0,999 при интервале доверия $\pm 0,05$ мгл. Ошибки измерений 1970 г. достигают $\pm 0,03$ мгл.

В 1965 и 1968 гг. было исполнено несколько серий наблюдений за вариациями силы тяжести на 11 вековых реперах Крымского геодинамического полигона. Точность измерений составляет $\pm 0,06$ мгл. Последняя величина характеризует точность съемки. Величина достоверной вероятности большинства связей колеблется от 0,802 до 0,860 при достоверном интервале $\pm 0,03$ мгл.

Последовательное сопоставление приращений силы тяжести между вековыми реперами на указанных профилях свидетельствует в целом о постоянстве направленности и интенсивности вариаций силы тяжести. А это позволяет считать глубинные процессы, обуславливающие изменение δg , устойчивыми во времени (по крайней мере для изучаемых периодов времени). Наблюдаемые отклонения δg , по всей вероятности, обусловлены ошибками измерений, а также подтверждают то, что вряд ли в недрах нашей планеты можно искать источник абсолютно правильной ритмичности протекания глубинных процессов.

С целью изучения площадного распределения δg на территории Украины нами построена схема вариаций силы тяжести с использованием данных наблюдений 1965 и 1968 гг. на участке Харьков—Киев—Винница и 1966 и 1970 гг. на профиле Запорожье—Винница—Львов—Липовое (рис. 3). В данном случае для более надежного выявления δg взяты измерения, разделенные максимальным интервалом времени. Значения δg вычислены от того же исходного пункта, что и на рис. 2. Средние квадратические ошибки (m) определяемых разностей δg для указанных выше периодов соответственно равны $\pm 0,07$ и $\pm 0,06$ мгл. Из 24 наблюденных пунктов на 12 пунктах δg превышает величину $2m$ и на четырех — $3m$.

Как мы видим, последняя схема составлена почти для того же интервала времени, что и схема на рис. 2. Это обстоятельство позволяет провести взаимный контроль определяемых значений вариаций силы тяжести и закономерностей их распределения на изучаемой территории.

На рис. 3 отчетливо выделяется три максимума увеличения δg . Это районы Никополь и Кривого Рога (δg составляет 0,12—0,13 мгл), район Умани, где δg достигает $+0,24$ мгл, и район Львова, для которого δg равно 0,22 мгл. Выделенные области положительных значений вариаций силы тяжести разделены зонами слабых отрицательных значений.

В Днепровско-Донецкой впадине (пункты Полтава и Лубны) наблюдается также уменьшение вариации силы тяжести. Глубокий минимум δg фиксируется на ряде пунктов Закарпатья (до $-0,35$ мгл).

На территории Крымского полуострова, где δg вычислены относительно пункта Симферополь, отмечается как положительное (Горный Крым), так и отрицательные (степной Крым) значения δg .

Анализ схем, представленных на рис. 2, 3, показывает, что независимыми измерениями, выполненными в разное время, разной аппаратурой, разными наблюдателями и по разной методике, устанавливается одинаковая закономерность в распределении областей возрастания и уменьшения вариаций силы тяжести. Это является неоспоримым доказательством реальности и достоверности выявляемых изменений силы тяжести для 1962—1970 гг.

Какова же количественная сходимость независимых вычислений δg ? В пунктах, идентичных для обеих схем, расхождение δg колеблется в пределах ошибок измерений. Так, в пункте Львов расхождение δg составляет $+0,01$ мгл, в пункте Винница — $+0,07$ мгл и в пунктах Умань и Кривой Рог — $+0,13$ мгл. Средняя квадратическая ошибка указанных разностей равна $\pm 0,09$ мгл.

Проконтролировав первые данные вторыми и установив, что их расхождения находятся в пределах возможных ошибок измерений (за исключением пункта Тернополь, где разность δg достигает $+0,21$ мгл, что требует своего уточнения), мы составили для территории УССР сводную схему вариаций силы тяжести за период 1962—1970 гг. Для идентичных пунктов вычислены средние арифметические значения δg , чем уменьшено влияние систематических ошибок.

Сводная схема вариаций силы тяжести (рис. 4), как показали вышеуказанные исследования, является однородной в отношении качества используемого обширного материала. Наличие значительного числа пунктов наблюдений позволяет более подробно представить распределение δg на всей территории республики. Выделенные на обеих схемах аномальные области δg полностью сохраняются на сводной схеме. Однако привлечение добавочных данных позволяет детализировать их и дать более дробное деление. Так, установленная в восточной части республики область значительных положительных значений δg разделилась на два участка (первый в районе Лозовой и второй южнее — в районе Токмака). Между ними расположена зона относительных уменьшений δg , имеющая форму замкнутого овала и захватывающая Запорожье (δg равно $+0,08$ мгл) и Никополь (δg равно $+0,12$ мгл).

Восточная и центральные области максимальных значений вариаций силы тяжести по линии Лубны—Кировоград—Новоукраинка разделены узкой зоной очень слабых отрицательных значений δg , достоверность которых из-за малой величины δg может быть поставлена под сомнение.

Правобережная часть Украины характеризуется значительным положительным фоном вариаций силы тяжести. Здесь рас-

положен центральный максимум значений δg , в районе Умани, и ряд других положительных аномальных областей δg , которые были выделены на указанных схемах. Отрицательный минимум δg , фиксируемый на северо-западе республики уже отмечался ранее. Между Львовом и Тернополем вырисовывается локальным участком отрицательных значений вариаций силы тяжести с центром в Золочеве, где δg равно $-0,14$ мгл.

В пределах Карпатского региона наблюдается резкая дифференциация вариаций силы тяжести как по направленности, так и по интенсивности. Краевая часть Восточно-Европейской платформы, внешняя и внутренняя зоны Предкарпатского прогиба характеризуются положительными значениями δg . При переходе к складчатым Карпатам отмечается резкое изменение знака вариаций силы тяжести. Градиент δg на границе этих структурных элементов составляет $0,22$ мгл. К границе с Закарпатским внутренним прогибом происходит уменьшение значений δg до $-0,28$ мгл (район Свалявы).

Приняв во внимание хорошую сходимость значений δg для идентичных пунктов, мы сочли возможным на сводной схеме представить распределение вариаций силы тяжести и в Крыму относительно единого исходного пункта, принятого при вычислении δg на всей территории Украины.

В целом Крым характеризуется отрицательными значениями δg . Для антиклинория Горного Крыма вариации силы тяжести изменяются от 0 до $-0,10$ мгл. Увеличение отрицательных значений δg наблюдается по направлению к Причерноморской впадине (до $-0,20$ мгл) и западной части Азово-Кубанского передового прогиба (до $-0,30$ мгл). Положительные значения δg фиксируются для Альминской впадины.

Проведенными на территории УССР наблюдениями за изменениями гравитационного поля во времени доказано существование вековых вариаций силы тяжести, а одинаковая закономерность в распределении вариаций силы тяжести и совпадение независимо определенных их значений свидетельствуют о реальности физической природы этих изменений.

В настоящее время выделяется ряд факторов, которые могут быть причиной этого явления [8, 18, 19, 28, 25]: процессы превращения вещества верхней мантии; миграция поверхности Мохоровичича; физические процессы, происходящие в земной коре; деформация фигуры Земли.

Следовательно, изучение вековых вариаций силы тяжести в комплексе с другими геодезическими и геофизическими параметрами (современными деформациями, тепловыми потоками, сейсмичностью и т. п.), а также с тектоникой имеет первостепенное значение для понимания физико-химических процессов, обуславливающих современную динамику земной коры и мантии.

1. Абакелия М. С. Об изменении силы тяжести во времени в связи с геотектоническими движениями на Кавказе. — «Проблемы советской геологии», 1936, 6, № 12.
2. Буланже Ю. Д. О вековых изменениях силы тяжести. — «Тр. совещания по методам изучения движений и деформаций земной коры», М., 1948.
3. Буланже Ю. Д. Вековые изменения силы тяжести. — «Геофизический бюллетень», 1962, № 12.
4. Буланже Ю. Д. Изменяется ли сила тяжести во времени? — «Земля и Вселенная», 1965, № 2.
5. Буланже Ю. Д., Щеглов С. Н. О вековых изменениях силы тяжести. — «Изв. АН СССР. Физика Земли», 1971, № 6.
6. Гофштейн И. Д. Неотектоника Карпат. Киев, «Наукова думка», 1964.
7. Зайдель З. А. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., «Наука», 1968.
8. Люстих Е. Н., Магницкий В. А. Вертикальные движения земной коры, изменения гравитационного поля во времени и перемещения подкоровых масс. — В кн.: Современные движения земной коры. М., АН СССР, 1963.
9. Матцова В. А. Уточненная карта скорости современных вертикальных движений земной коры на западе европейской части СССР и некоторые соображения о периоде этих движений. — В кн.: Современные движения земной коры. М., АН СССР, 1963.
10. Парийский Н. Н. Исследование временных изменений силы тяжести на Кавказе. — Тезисы докладов международного геофизического конгресса. М.—Л., 1973.
11. Собакар Г. Т. Развитие сети опорных гравиметрических пунктов методом треугольных полигонов. — «Геофизический сборник АН УССР», 1962, № 1(3). Киев, «Наукова думка».
12. Собакар Г. Т. Квазипериодические вариации силы тяжести Украины. — ДАН УССР, 1968, № 9. Киев, «Наукова думка».
13. Собакар Г. Т. Выбор оптимального числа гравиметров для одновременных наблюдений. — «Геофизический сборник АН УССР», 1970, № 34. Киев, «Наукова думка».
14. Собакар Г. Т. [и др.]. Изучение квазипериодических вариаций силы тяжести на профиле Запорожье—Львов (1966—1968 гг.) — ДАН УССР, серия Б, 1970, № 7. Киев, «Наукова думка».
15. Собакар Г. Т. Первые результаты исследований квазипериодических вариаций силы тяжести в Крыму (1965—1968 гг.) — ДАН УССР, серия Б, 1970, № 8. Киев, «Наукова думка».
16. Собакар Г. Т. [и др.]. Квазипериодические вариации силы тяжести на профиле Львов—Харьков и их связь с современными движениями земной коры. — ДАН УССР, серия Б, 1970, № 12. Киев, «Наукова думка».
17. Собакар Г. Т. Квазипериодические вариации силы тяжести на профиле Запорожье—Львов за 1966—1970 гг. — ДАН УССР, серия Б, 1972, № 1. Киев, «Наукова думка».
18. Собакар Г. Т. Квазипериодические вариации силы тяжести Земли, их природа и научно-прикладное значение. — «Геофизический сборник АН УССР», 1972, вып. 46.
19. Собакар Г. Т. Динамика Земли и ее тектонические следствия. — «Геофизический сборник АН УССР», 1973, вып. 50.
20. Соколовский И. Л., Волков Н. Г. Методика поэтапного изучения неотектоники. Киев, «Наукова думка», 1965.
21. Сомов В. И. Изучение устойчивости вековых реперов при комплексных исследованиях современных вертикальных движений земной коры в Карпатах. Материалы IV конференции молодых геофизиков Украины. Киев, «Наукова думка», 1971.

22. Сомов В. И. Создание сети вековых реперов для комплексного изучения современных движений земной коры на территории Карпатского региона. — В кн.: Геофизические исследования территории Украины. Киев, «Наукова думка», 1972.

23. Сомов В. И. Исследования по проблеме современных движений земной коры на геодинамических полигонах Украины. — «Геофизический сборник АН УССР», 1973, вып. 56. Киев, «Наукова думка».

24. Успенский И. С. Условия устойчивости геодезических центров и реперов. М., Геодезиздат, 1955.

25. Фотиади Э. Э. [и др.]. К вопросу о глобальных изменениях силы тяжести во времени. — ДАН СССР, 1967, т. 177, № 6.

26. Файтельсон А. Ш. Вековые изменения силы тяжести на Русской платформе. — ДАН СССР, 1969, т. 188, № 3.

27. Файтельсон А. Ш., Азаркина Е. А. Вековые изменения силы тяжести на Украине. — ДАН СССР, 1970, т. 195, № 1.

28. Файтельсон А. Ш. [и др.]. О выявлении вековых изменений силы тяжести. — «Прикладная геофизика», 1971, № 64.

29. Файтельсон А. Ш. [и др.]. Вековые изменения силы тяжести и геологическая структура. — «Бюл. МОИП», 1971, № 5.

30. Schleusener A., Morge W. Investigations of secular gravity variations in Iceland. — Geophys., 37, 4, 1971.

Работа поступила в редколлегию 21 мая 1974 года. Рекомендована Львовским филиалом математической физики Института математики АН УССР.