

А.П. Кистерский¹, В.В. Лапаева², Ю.А. Нефедьев², М.В. Кутленков²

¹ООО «Азимут», Зеленодольск, Россия

²Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта КГУ, Зеленодольский р-он, Россия
misan@list.ru

РАСЧЕТ МАЛЫХ ВЕЛИЧИН УКЛОНЕНИЙ МЕСТНОЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ, ВЫЗВАННЫХ ТЕХНОГЕННЫМИ ФАКТОРАМИ

Рассмотрено влияние годовых изменений уровня воды Куйбышевского водохранилища на поведение местной отвесной линии и широту Астрономической обсерватории им.Энгельгардта. Приведен метод расчета поправок за воду, величина которых может достигать 0.015". Показано, что изменение уровня воды водохранилища, приводит также к изменению уровня поверхности грунтовых вод речной долины. С использованием приближенных (лабораторных) данных пористости грунта и скорости движения грунтового потока оценено влияние этого эффекта на уклонение отвесной линии (около 0.005"). Годовое колебание отвесной линии за счет изменения уровня воды хорошо согласуется с годовой составляющей неполярных изменений широты.

Ключевые слова: водохранилища, сейсмическая активность, неполярные изменения широты.

Техногенное вмешательство в природу приводит к перераспределению значительных масс вещества в приповерхностном слое Земли. В крупных угольных бассейнах выдаются на-гора сотни млн. тонн угля в год. Крупнейшие водохранилища концентрируют порядка ста млрд. тонн воды, причем примерно половина этой массы является переменной – то увеличиваясь, то уменьшаясь в зависимости от режима работы ГЭС (Ступишин и др., 1981).

Всякое изменение распределения масс приводит к изменению направления отвесной линии в данном месте. А это неизбежно вызывает искажения в тех видах геодезических и астрометрических измерений, которые привязаны к направлению местной отвесной линии. Эти погрешности необходимо учитывать при обработке измерений. Изучение вариаций отвесных линий имеет и самостоятельное значение, т.к. многие геодинамические явления в недрах и на поверхности Земли тесно связаны с направлением силы тяжести.

Ранее А.П.Кистерским (Кистерский и др., 1990; Кистерский, 1993) был разработан метод вычисления вариаций отвесной линии вследствие колебания уровня воды Куйбышевского водохранилища и приведены вычисления величины этого влияния на наблюдения широты в Астрономической обсерватории им.Энгельгардта (АОЭ) и геометрическое нивелирование.

Суть метода заключается в следующем. Пусть на рис. 1 точка А – местоположение зенит-телескопа ЗТЛ-180, отрезок АО – отвесная линия для момента, соответствующего минимальному уровню воды в водохранилище. Широту для этого момента (угол АОЕ) обозначим φ_1 . Отрезок АО' – это отвесная линия на момент максимального уровня водохранилища, когда вектор дополнительной силы F_{NS} имеет наибольшее значение. Угол АО'Е (широту для данного момента) обозначим через φ_2 . Из рисунка видно, что $\varphi_2 > \varphi_1$, т.е. «лет-

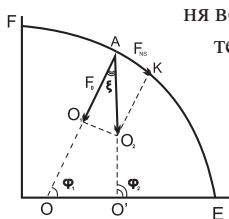


Рис. 1. Отклонение отвеса под действием дополнительной массы воды.

няя» наблюдаемая широта больше «зимней» на малый угол σ . Величину σ можно найти из треугольника $O_1 AO_2$. Вследствие малости угла ξ имеем:

$$\xi = \rho F_{NS} / F_0, \quad (1)$$

где $\rho = 206265''$. Величины F_0 и F_{NS} равны соответственно:

$$F_0 = fMR^{-2}; F_{NS} = fmr^{-2};$$

где f – гравитационная постоянная; R – радиус Земли; M – масса Земли; m – масса рассматриваемого объема воды, т.е. возмущающая масса; r – расстояние до исследуемой

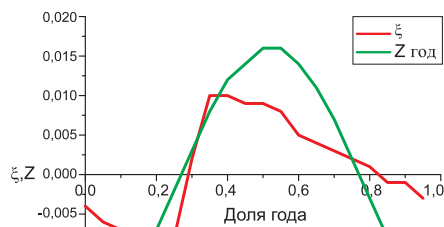


Рис.3. Сравнение влияния годового изменения уровня воды водохранилища на колебание линии отвеса (ξ) с годовой составляющей неполярных вариаций широты (Z год).

массы. Отметим, что m и r – переменные величины. Формулу (1) можно записать так: $\xi = Amr^{-2}$, где $A = \text{const} = \rho R^2 M^{-1} = 0.140453 \cdot 10^{-2}$. Здесь M выражено в тоннах, R – в метрах. В общем случае

$$\xi = Amr^{-2} \cos \alpha, \quad (2)$$

где α – угол между меридианом точки наблюдения и направлением на исследуемую массу.

Задача состоит в том, чтобы определить точное значение исследуемой массы m . В нашем случае, зная плотность воды, эту задачу можно свести к расчету площади водохранилища: площадь зеркала воды (в m^2) равна массе (в тоннах) для слоя воды в 1 м. Тогда с сохранением размерности массы m формулу (2) можно представить в виде:

$$\xi_0 = ASr^{-2} \cos \alpha, = AT, \quad (3)$$

где $T = Sr^{-2} \cos \alpha, т/м^2$.

В практических вычислениях достаточно ограничиться ближайшей, прилегающей к АОЭ ча-

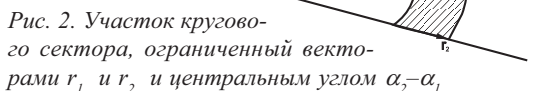


Рис. 2. Участок кругового сектора, ограниченный векторами r_1 и r_2 и центральным углом $\alpha_2 - \alpha_1$.

стью водохранилища, площадью 180 кв. км.

Рассматриваемый участок водохранилища был разбит на n секторов так, чтобы площадь каждого участка воды, попадающего в i -й сектор, достаточно точно описывалась частью кругового сектора с центром в обсерватории между радиусами r_1 и r_2 с раствором угла $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ (Рис. 2):

$$S^i = (\pi r_2^2 - \pi r_1^2) \Delta\alpha / (2\pi) = 0.5 \Delta\alpha / (r_2^2 - r_1^2),$$

где $\Delta\alpha$ выражено в радианах. Если перейти к пределу при $r_2 > r_1$ и $\alpha_2 > \alpha_1$, то легко показать, что

$$T^i = (dr/r) \cos\alpha \, d\alpha.$$

Проинтегрировав это выражение по r и α , получим:

$$T^i = (\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) (\ln r_2 - \ln r_1).$$

Таким образом, с учетом формулы (3) для i -го сектора участка воды толщиной 1 м имеем:

$$\xi_o^i = A(\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) (\ln r_2 - \ln r_1). \quad (4)$$

Расстояния r_1 и r_2 до ближнего и дальнего берега каждого сектора снимались с топографической карты масштаба 1:100000. Суммируя значений углов ξ_o^i по всем n секторам, мы нашли, что слой воды толщиной 1 м изменяет направление отвеса на 0.0043". Полученная величина относится к отметке уровня воды, равной 53 м в Балтийской системе высот. Другими словами, такое влияние оказывает слой воды между отметками 52.5 и 53.5 м. Влияние остальной части водохранилища на колебание отвеса в обсерватории, рассчитанное по мелкомасштабной карте, очень незначительно: $\Delta\xi = 0.0002$ ". Оно составляет всего 5% от приведенной величины ξ на уровне 53 м.

Уровень воды ежегодно изменяется в среднем на 6 м – от 53 м при так называемом нормальном подпорном уровне (НПУ) до 47 м перед весенним паводком. В отдельные годы уровень воды может снижаться до 46 м, а после обильного половодья повышаться до 55 м. Разумеется, при изменении уровня воды будет меняться и площадь водного зеркала. Известно, что площадь зеркала всего водохранилища в момент наибольшей сработки воды уменьшается на 40%. Поэтому, можно допустить, что у рассматриваемого участка водохранилища, площадь уменьшается на такую же величину. Следовательно, угол α на отметке 47 м составит 0.0026". Для всех промежуточных высот уровней воды H значения ξ_o проинтерполированы и приведены в табл. 1.

Таким образом, колебания отвесной линии в плоскости меридиана в отдельные годы могут достигать $\xi = 0.029$ ". Поэтому в текущие значения широты следует вносить поправки величиной до +0.0145" зимой и до –0.0145" летом.

Поправки «за воду» на конкретные даты за 1978 – 1985 гг. были вычислены по отметкам уровня воды водомерного поста «Верхний Услон». Для оценки эффективности этих поправок годовое колебание отвесной линии сравнили с наблюдениями широты. Изменения астрономических широт на 80 – 85 % обусловлены периодическим движением полюса. Остальная часть – это так называемый Z -член или неполярные изменения широты, спектр которых достаточно широк, а причины появления многообразны. Как уже отмечалось, колебания уровня воды имеют годовой период, поэтому они в основном скажутся на годовой составляющей Z -члена, которая, в свою очередь, может за-

висеть от многих факторов, как фиктивных (ошибки склонений и собственных движений наблюдаемых звезд), так и реальных (лунно-солнечные приливы). Поэтому для сравнения был взят переработанный ряд наблюдений, где были учтены все известные редукции. Компонента Z -члена с годовым периодом, полученная из этого ряда методом гармонического анализа, имеет вид: $Z_{\text{год}} = 0.016'' \cos(360^\circ \tau + 172^\circ)$.

H, м	ξ_o
54	0.00462''
53	0.00433''
52	0.00404''
51	0.00375''
50	0.00346''
49	0.00317''
48	0.00288''
47	0.00260''
Сумма $\sum \xi_o$	0.02885''

Табл. 1.

На рис. 3 приведено сравнение $Z_{\text{год}}$ с годовым колебанием отвесной линии ξ , из которого можно заключить, что остаточная годовая волна в неполярных изменениях широты в основном обусловлена влиянием годовых колебаний уровня воды. После учета поправок «за воду» годовая компонента в неполярных вариациях широты будет практически исключена.

Полученный результат является неполным без учета колебаний невидимых грунтовых вод. Одновременно с изменением уровня воды водохранилища будет изменяться и уровень грунтовых вод, что также отразится на положении отвесной линии в точке наблюдения.

1. Грунтовыми (безнапорными) называют воды первого от поверхности постоянного горизонта, расположенного на первом водоупорном слое. Они имеют свободную поверхность, зеркало которой существует длительное время и занимает либо горизонтальное, либо слегка наклонное положение, в большинстве случаев совпадающее с направлением наклона рельефа. Для рек платформенных областей со спокойным залеганием горных пород, к которым относится и река Волга, зеркало грунтовых вод повторяет поверхность современного рельефа (Справочное руководство гидрогеолога, 1979). При наклонном положении зеркала грунтовых вод, последние приобретают характер грунтового потока, который перемещается в сторону более низких отметок, например к реке, и тем самым питает реку. Если же уровень в реке поднимается, тогда, наоборот, воды реки начинают поступать в грунт, и грунтовый поток меняет направление движения (Климов, 1974). Следовательно, увеличение уровня воды Куйбышевского водохранилища приводит и к увеличению уровня поверхности (зеркала) грунтовых вод. С подъемом уровня в водохранилище, воды начинают поступать и в грунт, заполняя пустоты, или поры. А это значит, что переменная часть массы воды, связанная с годовыми колебаниями уровня водохранилища, имеет большую величину, нежели была подсчитана выше. Для определения этой величины надо знать долю пустот, или пор, имеющихся в грунте и заполняемых водой. Фактические значения коэффициентов пористости, полученные путем лабораторного анализа различных грунтов, приведены в (Справочное руководство..., 1979).

2. Грунтовые воды бассейна реки Волга относятся к типу грунтовых вод в речных долинах, и приурочены они к древним и современным аллювиальным песчано-гравийным, песчаным и песчано-глинистым отложениям. Согласно (Справочное руководство..., 1979; Гавич, 1988), коэффициенты общей пористости таких горных пород, для верхней части земной коры, выше первого водоупорного слоя, составляют от 35 до 50%, т.е., в среднем 42,5%.

Для расчета нужно определить размер того участка поверхности грунтовых вод, который подвержен годовым колебаниям вместе с водохранилищем, т.е. учесть размер участка речной долины.

За границу речной долины была принята горизонталь 65 метров, которая соответствует месту резкого перегиба рельефа. Более точно эту границу можно узнать после гидрогеологических исследований на участке-разреze «обсерватория-водохранилище».

Применяя вышеописанную методику и формулы, и средний табличный коэффициент пористости грунта 42%, мы получили величину дополнительного влияния колебания уровня воды в Куйбышевском водохранилище на уклонение местной отвесной линии и широту АОЭ. Она составила 0.000884" на каждый метр изменения уровня поверхности грунтовых вод, или – 0.0053" за 6-метровое, среднегодовое, изменение отметки, что в совокупности с предыдущим значением дает 0.0342".

Погрешность табличных (лабораторных) данных невелика, поэтому можно говорить о достаточной достоверности полученной величины уклонения отвесной линии.

Однако, для более строгого и полного исследования зависимости таких малых – тысячные доли угловой секунды – колебаний отвесной линии от местных геофизических условий, следовало бы провести инженерно-гидрогеологические изыскания на участке «обсерватория – водохранилище». Такие изыскания не только уточняют границы интересующего нас зеркала грунтовых вод, но и позволяют получить еще две важнейшие характеристики: точное значение коэффициента пористости местных прибрежных грунтов и скорость движения грунтового потока. Последняя величина может оказаться весьма существенной при учете этой дополнительной поправки, поскольку изменения уровня зеркала грунтовых вод должно отставать по времени от соответствующего изменения уровня воды в водохранилище. Величина этого отставания определяется скоростью движения грунтового потока. Скорость движения грунтового потока зависит от уклона его поверхности и от водопроницаемости грунтов, которая определяется коэффициентом фильтрации K .

Для приближенной оценки водопроницаемости преимущественно сыпучих грунтов существует ряд формул, в которых фильтрационные свойства грунта ставятся в зависимость от их гранулометрического состава. По одной из наиболее простых формул, для крупного песка $K=250\text{м/сут.}$, что соответствует, примерно, 2-3 дневному запаздыванию по фазе от изменения видимого зеркала водохранилища. Более точные и полные данные можно получить только после проведения гидрогеологических исследований.

Полученная поправка за техногенное вмешательство на порядок превышает величину поправки в нивелирование за счет систематического влияния лунно-солнечных приливов. Но уже приливные поправки превосходят точность геометрического нивелирования и учитываются при обработке результатов нивелирования 1 класса. Рассмотренная возможность учета данного эффекта может быть полезна при решении такой задачи высшей геодезии, как создание государственных сетей нивелирования высшего класса, и, в особенности, создание сетей нивелирования в целях исследования вертикальных движений земной коры.

3. В работе (Сигалов, 1984) показана возможность использования результатов геодезических измерений в ком-

плексе с геофизическими и сейсмологическими данными для оценки возможного времени проявления тектонических предвестников землетрясений и уточнения их характеристик. Еще более чувствительны к поведению местной отвесной линии оптические (классические) астрометрические инструменты, что позволяет использовать их как дополнительные средства при изучении тектонических предвестников землетрясений.

Литература

- Ступишин А.В., Трофимов А.Ф., Широков В.И. Географические особенности формирования берегов и ложа Куйбышевского водохранилища. Казань: изд-во КГУ. 1981. 184.
- Кистерский А.П., Лапаева В.В., Урасина И.А. Влияние уровня воды Куйбышевского водохранилища на широту Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта. *Кинематика и физика небесных тел*. Т.6. №6. 1990. 79-82.
- Кистерский А.П. Техногенное влияние на распределение масс у поверхности земли и учет его при высокоточном нивелировании. *Известия АОЭ*. №57. 1993.
- Климов О.Д. Основы инженерных изысканий. М.: Недра. 1974. 256.
- Еременко Н.А. Геология нефти и газа. М.: Недра. 1968. 385.
- Справочное руководство гидрогеолога*. Л.: Недра. Т. 1. 1979. 512.
- Королев М.Е. Общая гидрогеология. Казань: изд. КГУ. 1999. 312.
- Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М.: Недра. 1988. 350.
- Сигалов В.М. Исследование геодезическими методами тектонических предвестников землетрясений. *Геодезия и картография*. №8. 1984
- Можжерин В.И., Камалева Е.В., Шарифуллин А.Н. Изменчивость стока рек. Казань: Изд-во «Фэн». 2003.
- Можжерин В.И., Шлычков А.П., Шарифуллин А.Н. Прогноз изменения количества и качества поверхностных вод. Зеленая книга Республики Татарстан. Казань: изд-во КГУ. 1993.
- Можжерин В.И., Шлычков А.П., Шарифуллин А.Н. Поверхностные воды и водные ресурсы. Зеленая книга Республики Татарстан. Казань: изд-во КГУ. 1993. 51-55.
- Пояснительная Записка «Геодезическая основа карты современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК) территории СССР в масштабе 1:5000000». М. 1989.

A.P. Kistersky, V.V. Lapayeva, Yu.A. Nefed'ev, M.V. Kutlenkov.
Calculation of small deviations of local vertical due to man-induced factors.

This paper described influence of water level annual variations in Kuibyshev water storage basin on local vertical and latitude of Engelhard Astronomical Observatory. Analysis method of water correction, magnitude of which can achieve 0.015", is presented. It is shown, that water level variations in water storage basins also lead to groundwater surface variations of river valley.

Keywords: water storage basins, seismic activity, lateral observations.

Александр Петрович Кистерский
Главный инженер ООО «Азимут»

РТ, г. Зеленодольск, ул. Ленина, 30. Тел. (884371) 65575.

Юрий Анатольевич Нефедьев
Д.ф.-м.н., директор

Валентина Васильевна Лапаева
Старший научный сотрудник

Михаил Вячеславович Кутленков
Инженер астрометрического отдела

Астрономическая обсерватория им. В.П. Энгельгардта Казанского гос. университета. РФ, РТ, Зеленодольский р-он, ст. Обсерватория АОЭ. Тел. (884371) 65575.