

УДК: 551.438.5

ПРОГИБ ЗЕМНОЙ КОРЫ ОТ ВЕСА КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

В.В. ТЕТЕЛЬМИН¹,
Э.Р. ДАНИЕЛОВ²

¹ ВНИИГ им. Б.Е. ВЕДЕНЕЕВА² МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Впервые в гидротехнической науке выполнено моделирование и получены количественные результаты параметров прогиба земной коры от веса крупных водохранилищ: амплитуды и радиуса прогиба. Предлагается к использованию новый критерий прогиба земной коры от линейной нагрузки.

Ключевые слова: водохранилище, упругая земная кора, амплитуда прогиба.

В мировом регистре числится около 50 больших плотин с крупными водохранилищами, вес каждого из которых превышает 25 млрд тонн. Строительство крупных гидроузлов, таких как Братская, Красноярская и Саяно-Шушенская ГЭС, вызывает локально-изостатический отклик литосферы на созданную нагрузку. Автор учебника «Общая геология» Н.В. Короновский утверждает [2, с. 54]: «Любые достаточно значимые нагрузки на земную кору, например, искусственные водохранилища, глубокие карьеры, откачка подземных вод и нефти – все это должно приводить к изменению изостатического равновесия в региональном масштабе».

При моделировании процесса прогиба земной коры примем следующее допущение: мощность h земной коры (упругой части литосферы), в пределах которой она заметно проявляет упругие свойства, равна 36 км. Будем считать, что на глубинах больше этого значения горные породы имеют температуру выше 700° С и последовательно переходят из класса упругих в реологические классы упруго-пластичных и упруго-вязких. Косвенным подтверждением этого тезиса является наблюдаемое прекращение глубинной сейсмичности в зонах Беньофа при разогреве погружающихся плит до 700–800° С [10].

Землетрясения – это события, вызванные по преимуществу сдвиговым характером деформации. Если в

THE FLEXURE OF THE EARTH CRUST DEPENDING ON THE WEIGHT OF LARGE WATER STORAGE BASINS

V.V. TETELMIN, E.R. DANIELOV

For the first time in hydrotechnic science there was modeled and obtained quantitative results of the characteristics of the Earth crust flexure depending on weight of large water storage basins: range and radius of the flexure. It is proposed to use new criterion of the flexion.

KEYWORDS: water storage basin, springy Earth crust, range of flexure.

горячих горных породах с температурой выше 700° С напряжения сдвига не накапливаются, а достаточно быстро релаксируют, то эти породы при определенных условиях можно отнести к вязкому реологическому классу. По этой причине при моделировании процесса прогиба можно условно принять, что до глубины 36 км земная кора является твердым упругим телом, а подстилающие ее высокотемпературные горные породы являются упругой и одновременно высоковязкой жидкостью.

Водоохранилища крупных гидроузлов имеют большую протяженность, измеряемую десятками и сотнями километров, что дает в плане линейную нагрузку на земную кору. Это позволяет считать, что земная кора, рассеченная вертикальной плоскостью поперек оси водохранилища, находится в плоско-деформированном состоянии и прогиб земной коры можно рассматривать как плоскую задачу теории упругости. Поэтому процесс оседания земной поверхности и процесс прогиба всей толщи земной коры от линейной нагрузки P_0 (рис. 1) удобно рассматривать в плоскости, ориентированной в плане поперек оси водохранилища.

Реакция земной коры на приложенную линейную нагрузку состоит из двух видов вертикальных перемещений (рис. 2).

Первая вертикальная составляющая перемещений – это классическая осадка земной поверхности,

как реакция упругого полупространства на действие приложенной сосредоточенной силы в постановке Буссинеска. Максимальная осадка в месте приложения веса водохранилища равна S (рис. 2а). Размер $-2r$ чаши оседания и форма эпюры этих осадок зависят от упругих свойств и степени нарушения сплошности верхнего слоя земной коры.

Вторая вертикальная составляющая перемещений – это медленное погружение за счет изгиба упругой земной коры в подстилающее вещество упруго-вязкой верхней мантии. Вклад этой составляющей A_0 в общее перемещение вызван изгибом земной коры, аналогично изгибу балки на упругом основании. В этом случае размер чаши оседания $2R$ (ширина депрессии) больше размера $2r$, так как вызван погружением в упруго-вязкое полупространство мантии подошвы земной коры. При этом амплитуда погружения (стрела прогиба) A_0 меньше значения упругой осадки S .

Примером существования двух видов вертикальных перемещений от веса водохранилища являются натурные данные, полученные при выполнении четырехкратной геодезической съемки в районе водохранилища плотины Гувер (рис. 3).

В настоящее время проектировщики для определения осадки основания плотины, ложа водохранилища и прилегающей территории ограничиваются только первой составляющей осадки от гравитационной нагрузки, созданной водохранилищем. В данной работе рассмотрена задача по определению вклада второй составляющей перемещений в общую осадку территории. Используется двухэлементная модель плоской задачи: многослойная упругая земная кора, которая представляется в виде балки с изгибной жесткостью (EJ) , и подстилающая упруго-вязкая мантия в виде полуплоскости с модулем упругости $E_{осч}$ (рис. 1).

Модуль упругости E массива горных пород в пределах толщи земной коры может изменяться в пределах от 2×10^4 до 10×10^4 МПа. Изгибная жесткость (EJ) многослойной земной коры может изменяться в пределах от $5,0 \times 10^{22}$ до 35×10^{22} Н \times м². Модуль объемной упругости подстилающего земную кору мантийного веще-

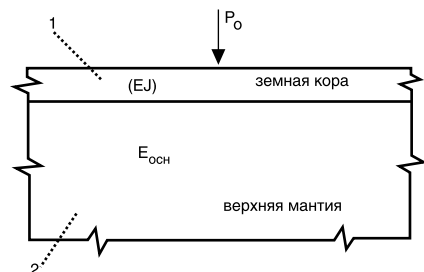


РИС. 1.

Расчетная схема нагружения упругой земной коры, лежащей на упруго-вязком основании: 1 – земная кора с изгибной жесткостью (EJ) ; 2 – упруго-вязкое полупространство мантийного вещества

ства характеризуется величинами $(8-10) \times 10^4$ МПа, а вязкость – порядка $10^{18}-10^{20}$ Па \times с [1,8].

При известных значениях мощности h_i и модуля Юнга E_i каждого из N слагающих земную кору слоев, можно определить ее суммарную эффективную изгибную жесткость $(EJ)_{эф}$. Например, многослойная земная кора мощностью 36 км, состоящая из трех слоев толщиной по 12 км, имеющих последовательно увеличивающийся с глубиной модуль упругости $E = 30, 60$ и 80 ГПа, имеет изгибную жесткость $(EJ)_{эф} = 22,5 \times 10^{22}$ Н \cdot м².

Основные условия и допущения при моделировании следующие:

1. Крупные водохранилища обеспечивают линейную нагрузку P_0 на земную кору. Например, в пределах глубоководной части водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС $P_0 = 200$ тыс. т/м = 2×10^9 Н/м.
2. В исходном состоянии земная кора (упругая плита) покоится на упруго-вязком полупространстве мантийного вещества и находится в состоянии изостатического равновесия.
3. Процесс прогиба земной коры под нагрузкой P_0 рассматривается как прогиб бесконечной балки на упругом основании в плоскости, ориентированной поперек оси водохранилища (плоская задача).
4. Радиус R воронки прогиба земной коры (полуширина депрессии) от веса крупного водохранилища может составлять десятки километров [3, 4]. При подобных масштабах водохранилище в рассматриваемой вертикальной плоскости представляется материальной точкой, а удельная нагрузка P_0 , как сосредоточенная сила.
5. Особенность моделирования процесса прогиба земной коры заключалась в том, что на глубине 36 км (условная подошва упругой земной коры) допускался свободный сдвиг между нижней гранью балки и упругим основанием.

Решалась плоская задача теории упругости. Расчет балки (модели упругой земной коры) на упругом

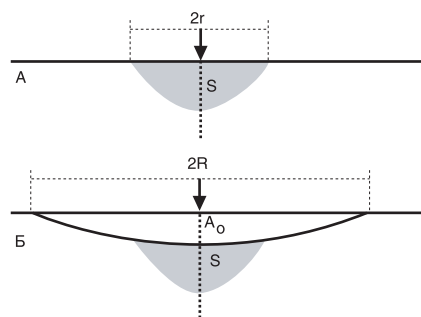


РИС. 2.

Две составляющие перемещений земной коры от воздействия линейной гравитационной нагрузки, создаваемой весом водохранилища: а – классическая осадка S (по Буссинеску); б – амплитуда прогиба A_0 и размер чаши прогиба $2R$ земной коры

основании выполнялся численно, с применением ПК «ЛИРА» методом конечных элементов. Определялись перемещения узлов и напряжения в элементах. Анализировалось влияние на результаты расчета размеров выделенного фрагмента полуплоскости, различных граничных условий и механических характеристик горных пород. Основная модель представлялась балкой длиной 300 км и высотой 36 км, которая состояла из трех слоев по 12 км. Значения модуля упругости этих слоев увеличивались по мере заглубления: $E=3, 6 \text{ и } 8 \times 10^4$ МПа. Коэффициент Пуассона принят равным 0,26.

Балка разбивалась на прямоугольные плоские элементы размером 10×12 км, в месте приложения нагрузки размеры уменьшались. Упругое основание, на котором лежала балка, представлялось вертикальными упругими связями (пружинами), которые заменяли упругий нижележащий слой толщиной 150 км. Нагрузка в виде удельной сосредоточенной силы $P_0=2000$ МН/м представляла средний в разрезе года вес воды в отсеке толщиной 1 м водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС. Собственный вес фрагмента земной коры по сравнению с нагрузкой от веса водохранилища имел несоизмеримо большую величину, поэтому расчет на действие собственного веса выполнялся отдельно.

Результаты расчета балочной модели земной коры сравнивались с решением классической задачи расчета полуплоскости на действие сосредоточенной силы, при прочих равных условиях. На рис. 4 и 5 приведены соответствующие расчетные эпюры вертикальных перемещений.

На рис. 4 приводятся результаты вычисления на двух моделях вертикальных перемещений узлов на глубине 36 км. В первом случае моделируется монолитное упругое полупространство. Во втором случае на глубине 36 км выполнено рассечение полупространства горизонтальной плоскостью, отделяющей упругую земную кору и подстилающую упруго-вязкую мантию. Выполненный на этой модели разрез допускает сдвиг,

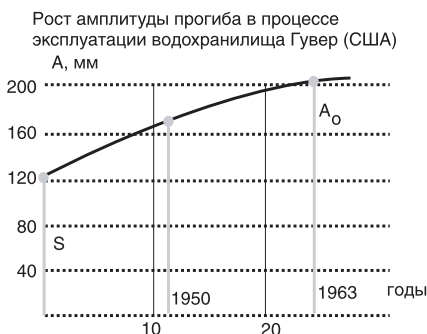


РИС. 3.

Натурные данные по динамике прогиба земной коры в районе водохранилища плотины Гувер

позволяющий нижней плоскости балки (подошве земной коры) скользить вдоль поверхности упруго-вязкого мантийного вещества. Из рис. 5 видно, что выполненный разрез существенно увеличивает амплитуду погружения балки (земной коры) в мантийное вещество. Дополнительная степень свободы, которую получает выделенная горизонтальной плоскостью балка, обеспечивает также увеличение радиуса прогиба территории от веса водохранилища.

Земная кора моделировалась плоской трехслойной балкой-стенкой на упругом основании. Упругое основание имело два варианта модуля упругости $E_{осн} = 80 \text{ и } 100$ ГПа. Каждый из трех слоев балки имел толщину 12 км. Модуль упругости слоев увеличивался с глубиной и имел значения $E = 3, 6 \text{ и } 8 \times 10^4$ МПа. Эти

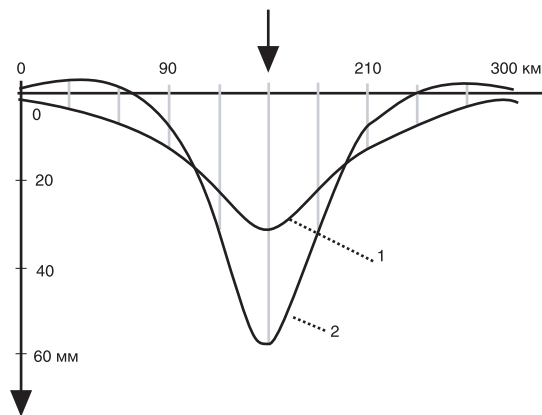


РИС. 4.

Совмещенные эпюры вертикальных перемещений горизонтальной плоскости на глубине 36 км в полупространстве с модулем упругости $E = 8 \times 10^4$ МПа от действия линейной нагрузки $P_0=2000$ МН/м: 1 — при монолитном полупространстве; 2 — при рассеченном полупространстве (модель балки)

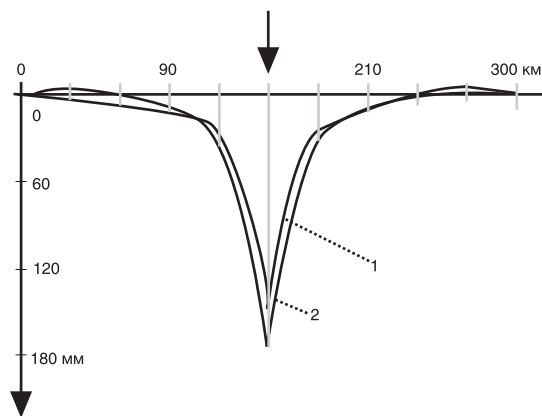


РИС. 5.

Совмещенные эпюры вертикальных перемещений земной поверхности при условиях рис.3: 1 — при монолитном полупространстве; 2 — при рассеченном полупространстве

значения примерно соответствуют физико-механическим свойствам земной коры в районе расположения Саяно-Шушенской ГЭС [4], имеющей слоисто-блоковое строение и мощность до 50 км.

Результаты выполненных расчетов приводятся на рис. 6–8.

Общее вертикальное перемещение ложа водохранилища от нагрузки 200 тыс. т/м составило 178 мм, из которых 58 мм обусловлены прогибом всей толщи земной коры, лежащей на упругом основании $E_{очн} = 80$ ГПа. Отсюда следует, что собственно осадка земной поверхности от веса водохранилища в классическом понимании составляет всего $S = 120$ мм. Радиус чаши оседания поверхности около 35 км, а радиус прогиба около 84 км. За пределами радиуса прогиба наблюдается небольшое компенсационное поднятие территории (около 2 мм). Значение максимальных горизонтальных сжимающих напряжений в районе приложения нагрузки $\sigma_x = 81$ кПа. Максимальное горизонтальное растягивающее напряжение на подошве земной коры составляет 52,7 кПа. Расчет показывает, что техногенные нормальные и сдвиговые напряжения в земной коре фиксируются не только на удалении 10 км от водохранилища (рис. 8), но и на удалении 100 км от точки приложения нагрузки.

Когда упругая земная кора подстилается более жестким основанием с $E_{очн} = 100$ ГПа, общее вертикальное перемещение уменьшается и составляет 168 мм, амплитуда прогиба тоже уменьшается до 48 мм, а собственно осадка поверхности от нагрузки остается неизменной – 120 мм.

Для определения влияния изгибной жесткости земной коры на амплитуду и радиус прогиба выполнены расчеты трех однородных по упругости балок длиной 300 км и высотой 36 км на упругом основании с модулем упругости 8×10^4 МПа. Значения модуля упругости каждой из трех балок составляли соответственно 3, 6 и 8×10^4 МПа. На рис. 9 приводится пример деформированной схемы и эпюр расчетных вертикальных перемещений верхней и нижней граней упругой балки от линейной нагрузки $P_o = 200$ тыс. т/м (табл. 1).

Во всех расчетных моделях в процессе погружения допускалось свободное скольжение (свободный сдвиг) подошвы земной коры по подстилающей упруго-вязкой мантии, то есть силами вязкого трения пренебрегали. В данных условиях процесс деформирования представлял собой изгиб бесконечной упругой балки на упругом основании.

Во всех расчетных случаях наблюдался прогиб нижней плоскости балки (подошвы земной коры) в упругое подстилающее полупространство мантийного вещества. Этот прогиб без изменений передается на дневную поверхность и формирует (определяет) большую по величине полуширину депрессии (большой радиус прогиба) R на дневной поверхности: от 68

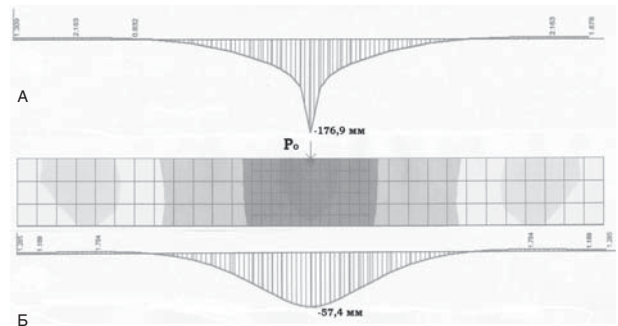


РИС. 6.

Изополя и эпюры расчетных вертикальных перемещений поверхности (а) и подошвы (б) модели трехслойной земной коры от линейной нагрузки $P_o = 2000$ МН. Мощность коры 36 км (12 км \times 3). Модуль упругости подстилающего основания $E_{очн} = 8 \times 10^4$ МПа

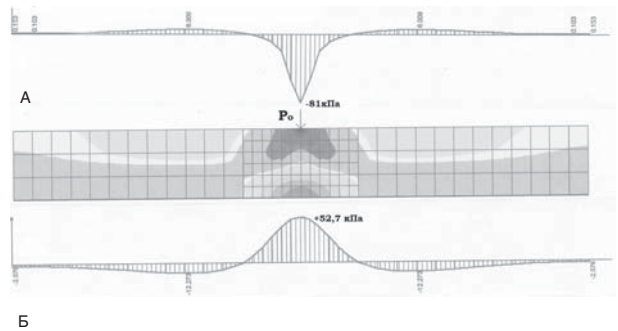


РИС. 7.

Изополе и эпюры расчетных горизонтальных напряжений (кПа) по дневной поверхности (а) и подошве (б) трехслойной земной коры толщиной 36 км, прогнувшейся под воздействием линейной нагрузки $P_o = 200$ тыс. т/м. Мощность земной коры 36 км (12 км \times 3). Модуль упругости основания $E_{очн} = 8 \times 10^4$ МПа

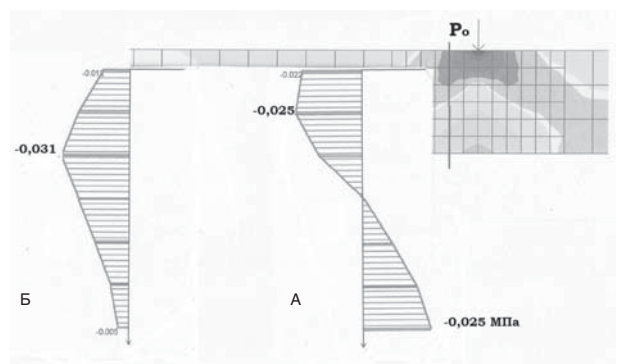


РИС. 8.

Эпюры напряжений (МПа) в поперечном сечении трехслойной земной коры на расстоянии 10 км от водохранилища: а – нормальные горизонтальные напряжения; б – вертикальные касательные напряжения

ТАБЛИЦА 1.

Параметры упругого прогиба земной коры толщиной 36 км от удельной линейной нагрузки 2000 МН/м, создаваемой водохранилищем. Модуль упругости основания $E_0=8 \times 10^4$ МПа

№	Модуль упругой коры E, МПа	Изгибная жёсткость коры EJ, Нм ²	Радиус влияния прогиба R, км	Радиус влияния осадки r, км	Амплит. прогиба коры A ₀ , мм	Амплитосадки поверхн S, мм	Вертик. перемещ. поверхн. (A ₀ +S), мм	Максим. растягив. напряж. σ, кПа
1	3·10 ⁴	11,7·10 ²²	68	32	64	140	204	33
2	6·10 ⁴	23,4·10 ²²	81	35	55	77	126	43
3	8·10 ⁴	31,2·10 ²²	88	37	52	52	104	48

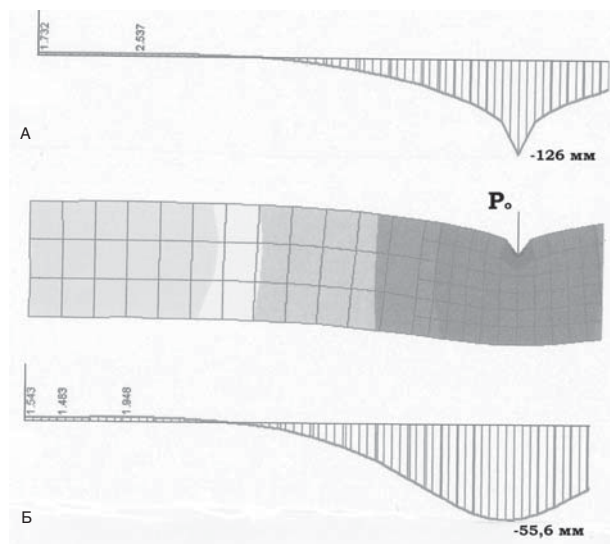


Рис. 9.

Деформированное изополе и эпюры вертикальных перемещений поверхности (а) и подошвы (б) однородной земной коры от линейной нагрузки $P_0=200$ тыс. т/м. Мощность коры 36 км. Модули упругости земной коры и основания, соответственно $E=6 \times 10^4$ МПа и $E_{осн}=8 \times 10^4$ МПа

до 88 км. При этом радиус влияния собственно осадки поверхности от приложенной нагрузки (по Буссинеску) изменялся в пределах от 32 до 38 км. Эффект прогиба упругой земной поверхности от линейной нагрузки существенно увеличивает область влияния водохранилища.

Таким образом, создание крупных водохранилищ всегда обеспечивает прогиб земной коры, характеризующийся относительно небольшой амплитудой A_0 и большим значением радиуса прогиба R . На рис. 10 приводятся графики зависимости расчетных значений радиуса прогиба и амплитуды прогиба нижней плоскости расчетной балки (условной подошвы земной коры) от ее изгибной жесткости.

Увеличение нагрузки на земную кору практически не увеличивает радиус прогиба, зато существенно увеличивает амплитуду прогиба. Например, при увеличе-

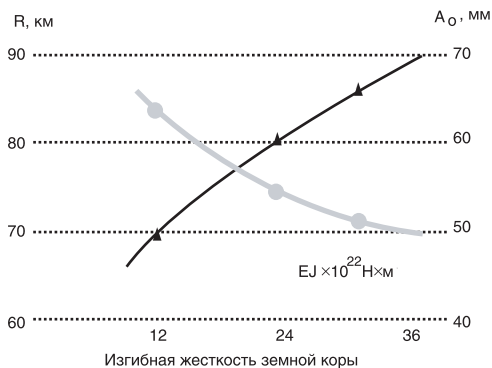


Рис. 10.

Расчетные зависимости радиуса и амплитуды прогиба (погружения) земной коры от ее изгибной жесткости: сосредоточенная нагрузка $P_0=200$ тыс. т/м; модуль упругости основания $E_{осн}=8 \times 10^4$ МПа

нии удельной нагрузки с 2000 до 3000 МН/м радиус прогиба практически не увеличивается, а амплитуда прогиба растет пропорционально нагрузке с 55 до 83 мм.

Следует отметить, что в реальности земная кора в свое конечное расчетное состояние придет не сразу, так как этому будет препятствовать высокая вязкость подстилающего мантийного вещества. В расчетной модели допускалась возможность свободного скольжения подошвы земной коры вдоль горизонтальной плоскости рассечения на глубине 36 км. Поэтому в действительности радиус прогиба R и амплитуда прогиба A_0 будут увеличиваться постепенно на протяжении многих лет эксплуатации гидроузла.

В работах [6, 7] получен безразмерный комплекс, составленный из основных размерных параметров, определяющих процесс прогиба упругой земной коры:

$$Te = \frac{(Ej)A_0}{R^3 P_0} \quad (1)$$

Если подставить в (1) расчетные параметры прогиба из приведенной таблицы, то для всех моделей значе-

ние критерия прогиба Te оказывается примерно одинаковым ($Te = 0,012$). Поэтому в дальнейшем можно считать, что значение критерия $Te = 0,012$ является постоянным для всех возможных сочетаний параметров процесса прогиба земной коры, лежащей на упругом основании с модулем $E_{осн} = 80$ ГПа. Расчеты показывают, что для процесса прогиба земной коры на упругом основании с модулем $E_{осн} = 100$ ГПа значение критерия прогиба другое, но тоже постоянное: $Te = 0,0105$.

Постоянство значения критерия Te можно использовать для экспериментального определения изгибной жесткости земной коры в районах крупных водохранилищ. Для этого необходимо в процессе эксплуатации крупных гидроузлов периодически выполнять геодезические работы по определению текущих и конечных значений амплитуды A_0 и радиуса прогиба R прилегающей территории.

Существует уникальный пример [3] проведения подобных геодезических работ на гидроузле Гувер (рис. 3). Там в 1935 г. перед началом заполнения водохранилища объемом 35×10^9 м³ была проведена высокоточная нивелировка по нескольким линиям, общая длина которых составила более 1000 км. В 1940 г. сразу после наполнения водохранилища, создающего удельную нагрузку на земную кору $P_0 = 4 \times 10^9$ Н/м, нивелирование повторили. Измерения показали, что на тот момент максимальная амплитуда упругой осадки земной поверхности составила $S = 120$ мм. К 1950 г. общая амплитуда вертикальных перемещений ($S + A_0$) достигла 170 мм, а к 1963 г. составила $(S + A_0) = 200$ мм. Следовательно через 24 года эксплуатации водохранилища амплитуда прогиба составила $A_0 = 80$ мм. К этому времени процесс прогиба земной коры еще не завершился: скорость ее погружения составляла 2,3 мм/год. Радиус прогиба R земной коры составил не менее 70 км. При модуле упругости верхней мантии 100 ГПа, критерий прогиба можно принять $Te = 0,0105$. Используя приведенные натурные данные, из выражения (1) можно получить реальное значение изгибной жесткости (EJ) земной коры в районе водохранилища Гувер на р. Колорадо.

Если предположить, что процесс прогиба в 1963 г. завершился, то изгибная жесткость земной коры составляет $(EJ) = 18 \times 10^{22}$ Н \times м². Если учесть, что процесс еще некоторое время продолжался, и амплитуда прогиба увеличилась до значения $A_0 = 90$ мм, то реальное значение изгибной жесткости земной коры в районе плотины Гувер составляет $(EJ) = 16 \times 10^{22}$ Н \times м². Если принять мощность упругой земной коры в этом районе $h = 36$ км, то ее эффективный модуль упругости равен $E = 40$ ГПа.

ВЫВОДЫ

1. Строительство и эксплуатация крупных водохранилищ сопровождается не только классической осадкой земной поверхности, но и прогибом (погружени-

ем) упругой земной коры в подстилающее вещество верхней мантии. При больших значениях удельной гравитационной нагрузки амплитуда прогиба может приближаться к 100 мм.

2. За счет прогиба земной коры зона силового воздействия крупных водохранилищ увеличивается до 70–80 км.

3. Процесс прогиба вносит изменения в напряженно-деформированное состояние земной коры и может являться причиной наблюдаемых сейсмических событий с гипоцентром на большой глубине и большом удалении от водохранилищ.

4. Подвижность геологической среды, обусловленная прогибом земной коры, может являться причиной возникновения криповых движений, наблюдаемых в створах больших плотин.

Литература

1. **Артюшков Е.В.** Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 456 с.
2. **Короновский Н.В.** Общая геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 448 с.
3. **Никонов А.А.** Современные движения земной коры. М.: КомКнига, 2007. 192 с.
4. **Савич А.И., Речицкий В.В.** О влиянии Саяно-Шушенской ГЭС на геодинамические процессы в земной коре // Гидротехническое строительство. 2013. № 7. С. 39–48.
5. **Тетельмин В.В.** Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз. М.: Издательский дом ЛИБРОКОМ, 2011. 240 с.
6. **Тетельмин В.В.** Воздействие крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры // Доклады V Всерос. совещ. гидроэнергетиков. НП «Гидроэнергетика России». СПб. 2013. С. 198–200.
7. **Тетельмин В.В.** Механизм прогиба земной коры от веса крупных водохранилищ // Тр. Третьей тектонофизической конференции ИФЗ им. О. Шмидта. Т. 2. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 335–339.
8. **Теркот Д., Шуберт Д.** Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред. М.: Мир, 1985. Т. 1. 376 с.
9. **Хаин В.Е., Ломизе М.Г.** Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
10. **Родкин М.В., Никитин А.Н., Васин Р.Н.** Сейсмотектонические эффекты твердофазных превращений в геоматериалах. М.: ГЕОС, 2009. 198 с.

Тетельмин Владимир Владимирович,

д.т.н., г.н.с. Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева,

☎ 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21,
тел.: +7 (812) 535-54-45, +7 (903) 785-18-78

Даниелов Эдуард Рубенович,

к.т.н., профессор Московского государственного машиностроительного университета,

☎ 107023, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 32,
тел.: +7 (910) 444-03-84