

ВЛИЯНИЕ СЕЙШЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА НА ФЛЮКТУАЦИЮ ФАЗЫ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Л. Н. Захаров

В работе установлена связь между сейшевыми колебаниями поверхности водохранилища и флюктуацией фазы акустического сигнала. Показано, что с увеличением частоты сигнала медленные флюктуации фазы, вызванные сейшами, уменьшаются.

При изучении влияния ветрового поверхностного волнения на флюктуации фазы тональных акустических сигналов нами иногда наблюдались медленные сильные флюктуации амплитуды и фазы, на первый взгляд несвязанные с состоянием свободной поверхности. Было замечено, что они по времени совпадали с резкими изменениями направления ветра или наблюдались после прохода больших судов. Более детальное изучение колебаний водной поверхности показало, что эти флюктуации вызывались сейшами.

Сейши представляют собой типичные стоячие колебания всей массы воды в закрытых или полужакрытых водоемах; различают одноузловые, двухузловые и так далее сейши. При одноузловых сейшах уровень воды у одного берега поднимается и в то же время опускается у другого. Период одноузлового сейшевого колебания приблизительно можно вычислить по формуле Мериана $T = 2l/gh$ [1], где T — период колебания, l — длина бассейна в направлении колебания, g — ускорение силы тяжести, h — средняя глубина бассейна.

Ширина водохранилища в месте проведения наших опытов была около 1,5 — 2 км, средняя глубина 3 — 3,5 м, длина водохранилища 15—20 км со средней глубиной 5—6 м. Соответственно период поперечных (по отношению к оси вытянутого водохранилища) сейшевых колебаний, вычисленный по приведенной формуле, был равен 1,5 — 2,5 мин и продольных сейшевых колебаний — 15—20 мин.

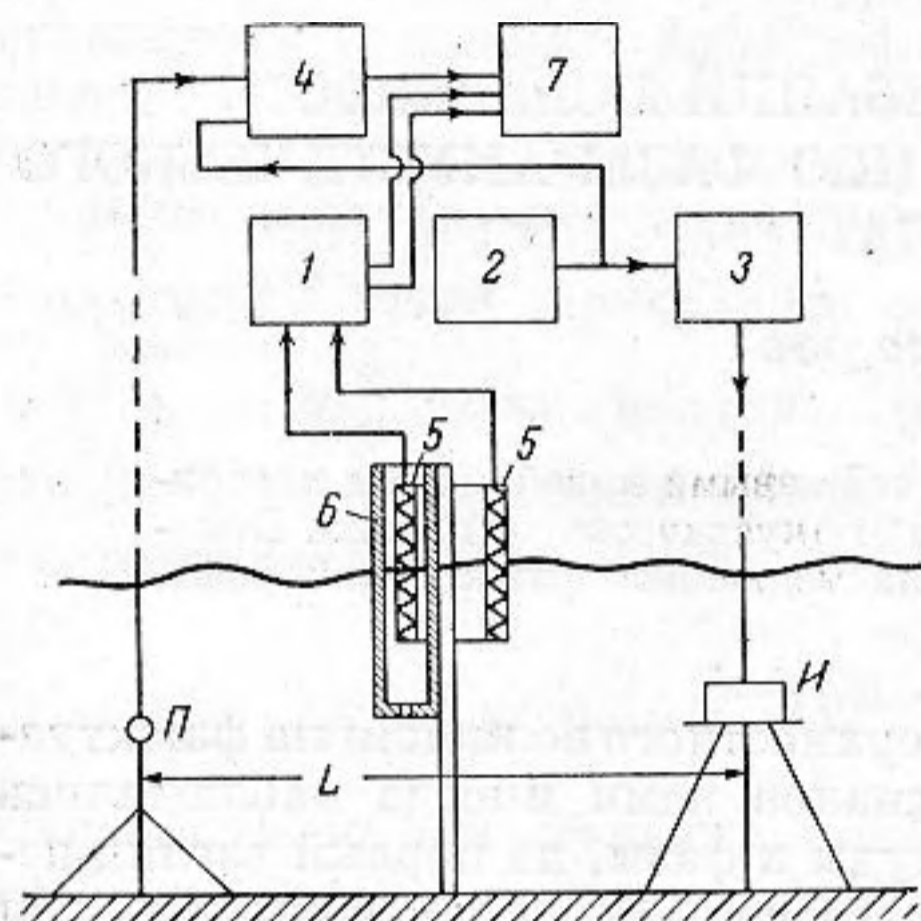
Наличие сейшевых колебаний было установлено первоначально в узкой закрытой бухте, в которую впадал ручей. При поднятии уровня воды течение ручья в устье изменялось и складывалось впечатление, словно ручей «вытекает» из водохранилища. Измеряя время, протекающее между моментами «обращения» потока, можно было ориентировочно определить период сейшевого колебания; оказалось, что он с достаточной точностью совпадал с периодами медленных флюктуаций фазы звукового сигнала.

В дальнейшем для регистрации медленных изменений уровня водохранилища был использован один из струнных датчиков волнографа. Он был помещен в стальную трубу с заглушенным нижним концом; в заглушающей шайбе было сделано отверстие диаметром 1 см. Такая система представляет собою своеобразный механический фильтр нижних частот. Чувствительность модифицированного датчика по отношению к поверхностному ветровому волнению с периодом 1,5—2 сек была на 20—25 дб меньше по сравнению с чувствительностью по отношению к сейшевым колебаниям.

На основании непосредственного анализа результата измерений мы различали колебания поверхности с периодом 1,5 — 2 мин (поперечные сейши) и 15—20 мин (продольные сейши). Амплитуда поперечных колеба-

ний была около 2 см, амплитуда продольных, которые наблюдались значительно реже, — от 0,5 до 4 см. Полученные при опытах величины периодов хорошо совпадали с расчетными, приведенными выше.

Равенство периодов медленных флюктуаций фазы и сейш позволяют сделать вывод о связанности этих двух явлений. Для более детального изучения этой связи, нами были проведены эксперименты по изучению влияния сейшевых колебаний на флюктуацию фазы тональных акустических сигналов. Опыты проводились на акватории пресноводного водохранилища подробно описанного в работе [2]; средняя глубина водного слоя была около 1,5 м.



Фиг. 1

Приемная и излучающая аппаратура помещалась на одном понтоне, который стоял на якорях. Блок-схема установки приведена на фиг. 1, где 1 — волнограф, 2 — задающий генератор, 3 — усилитель, И — направленный в горизонтальной плоскости излучатель, II — сегнетоэлектрический звукоприемник, 4 — фазометр, 5 — волнограф, 6 — механический фильтр, 7 — шлейфовый осциллограф.

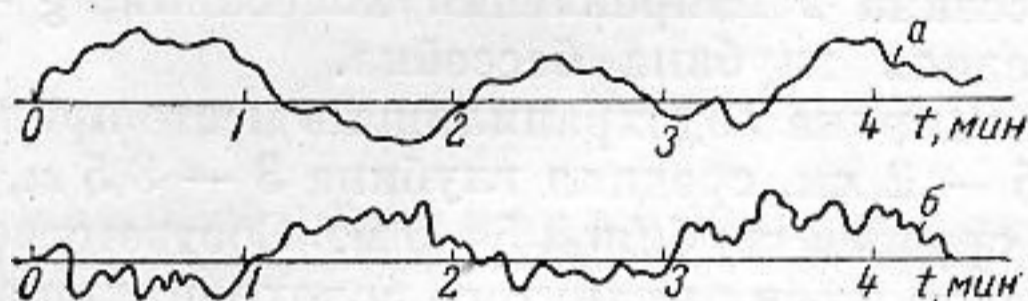
Излучатель и звукоприемник крепились к металлическим треногам, которые затем ставились на грунт. При опытах измерялась разность фаз между опорным сигналом задающего генератора и сигналом, принимаемым гидрофоном.

На кинолентку шлейфового осциллографа одновременно записывались флюктуации разности фаз и уровень свободной поверхности. По исходным записям были определены среднеквадратичные отклонения флюктуации

фазы $\sqrt{\overline{\Delta\psi^2}}$ мксек, вызываемые сейшевыми колебаниями. Амплитуда и период сейшевых колебаний определялись по непосредственным записям уровня поверхности водохранилища, произведенными с применением описанного выше механического фильтра. Дополнительно производилась обработка записей поверхностной волны на механическом корреляторе, также позволявшая определять амплитуду сейшевых колебаний, так как периоды ветровой волны и сейш отличались в нашем случае более чем в 20—40 раз.

На фиг. 2 приведены кривые изменения фазы сигнала *a* и поверхностного уровня водохранилища *б*, построенные на основании первичных записей. Запись флюктуации фазы произведена на частоте 720 гц при расстоянии между приемной и излучающей базами, равном 10 м. На кривой *a* отчетливо видны медленные изменения фазы с периодом около 2 мин; на основной период наложены более высокочастотные изменения фазы с меньшей амплитудой. Изменения уровня поверхности водохранилища во времени, приведенные на кривой *б*, имеют ту же основную периодичность, что и для кривой *a*.

Для сравнения на фиг. 3, 4 представлены осциллограммы флюктуаций фазы и поверхностного волнения (запись поверхностного волнения произведена без механического фильтра), где *a* — запись флюктуации фазы, *б* — запись мгновенного уровня поверхности водохранилища. Эти запи-



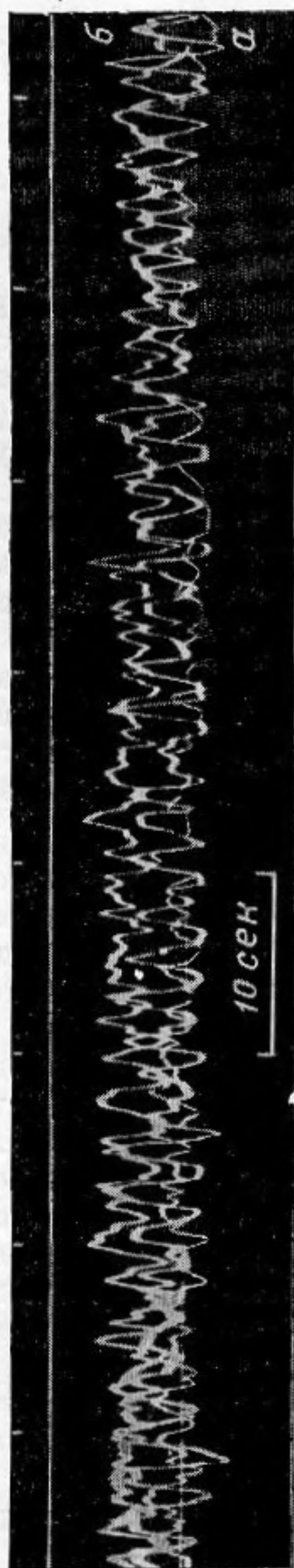
Фиг. 2

си получены при том же расстоянии между излучателем и приемником (10 м).

На фиг. 3 (соответствующей частоте сигнала 2,1 кГц) медленные флюктуации ($T = 2$ мин) мало заметны на фоне более быстрых ($T = 15$ сек). При увеличении частоты до 9 кГц (фиг. 4) медленные флюктуации практически исчезают, остаются лишь флюктуации, связанные с ветровой поверхностной волной.



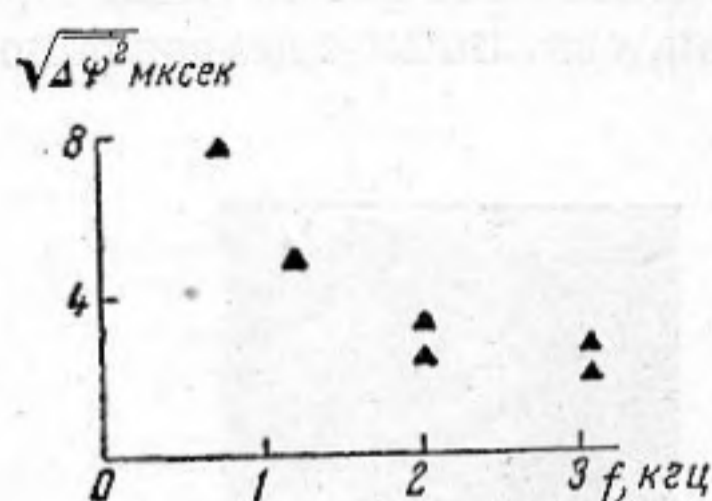
Фиг. 3



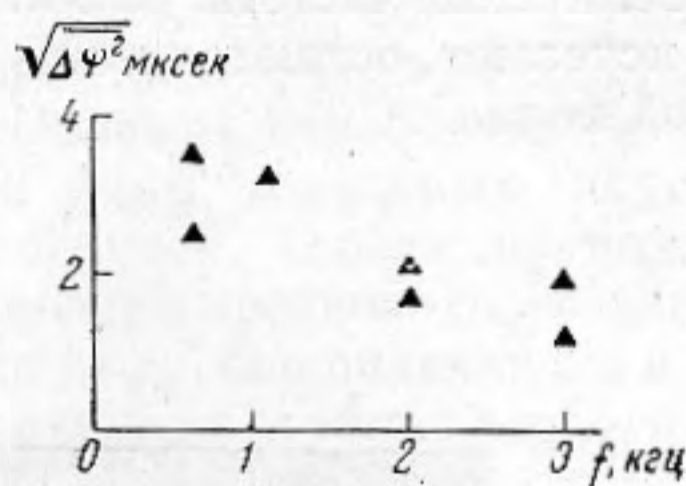
Фиг. 4

Полученные результаты могут быть объяснены различным изменением фазовых скоростей отдельных нормальных волн, распространяющихся в слое с изменяющейся во времени глубиной. Действительно, фаза акустического сигнала в точке наблюдения определяется как сумма фаз отдельных нормальных волн. Фазовая скорость каждой нормальной волны зависит от глубины места и номера волны. Изменение глубины, вызванное сейшевыми колебаниями, изменяет фазовые скорости отдельных нормаль-

ных волн, что в конечном счете приводит к изменению суммарной фазы, регистрируемой фазометром. При периодическом изменении глубины на трассе распространения звука будет изменяться периодически (флюктуировать) и фаза тонального сигнала. На низких частотах сигнала при малом

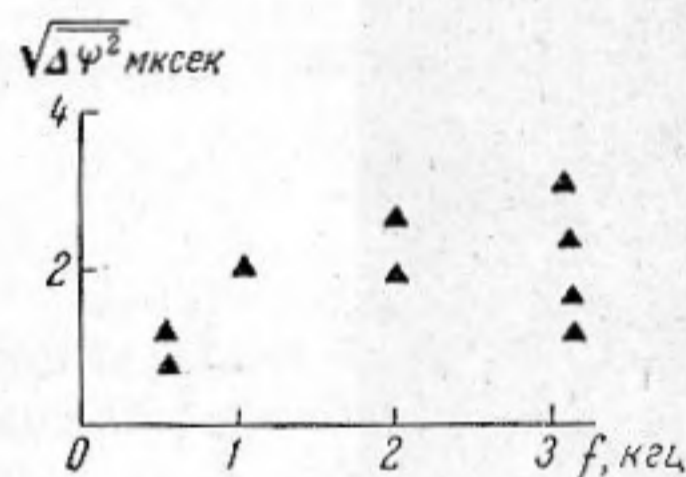


Фиг. 5



Фиг. 6

числе нормальных волн, распространяющихся в слое, медленные флюктуации значительны, поверхностное же ветровое волнение оказывает малое влияние на интерференционную картину в точке наблюдения. Напротив, на высоких частотах (например, 9 кГц) при множестве нормальных волн в слое среднее значение суммарной фазы меняется мало; этому усреднению способствует поверхностное ветровое волнение, воздействие которого на мгновенные значения фазы с ростом частоты увеличивается.



Фиг. 7

На фиг. 5—7 приведены результаты обработки осциллограмм медленных флюктуаций фазы, полученных при различных расстояниях между излучателем и приемником звука. По оси ординат отложены среднеквадратичное отклонение фазы $\sqrt{\Delta\psi^2}$ в мксек, по оси абсцисс — частота сигнала в кГц.

Нетрудно видеть (фиг. 5, расстояние $L = 10$ м), что с ростом частоты медленные флюктуации уменьшаются. Наибольшие флюктуации при данном расстоянии между излучателем и приемником наблюдались на частоте 720 гц. Следует заметить, что средний период флюктуаций был порядка 2 мин, т. е. они по периоду совпадали с поперечными сейшевыми колебаниями водохранилища, амплитуда которых была около 2 см.

С увеличением расстояния L характер влияния сейш на флюктуации фазы изменяется. При $L = 40$ м (фиг. 6) мы имеем общее уменьшение величины флюктуаций по сравнению с данными, приведенными на фиг. 5. Общая тенденция к уменьшению флюктуаций с ростом частоты сохранилась. На фиг. 7 приведены результаты, полученные при расстоянии $L = 140$ м. В этом случае в точке приема звука оставалась практически одна первая мода на всех частотах, на которых проводился эксперимент ($f \leq 3,2$ кГц). Казалось бы, что в этом случае флюктуации должны быть примерно одинаковыми, вне зависимости от частоты. Однако при исследовании зависимости медленных флюктуаций фазы от расстояния при наличии сейш приходится считаться с косвенным влиянием ветровой волны, которая сама по себе не может вызывать медленных колебаний фазы, но при определенных условиях является источником зарождения волновых мод высших порядков, на которые окажут влияние медленные колебания уровня поверхности.

По-видимому, этим обстоятельством вызвано некоторое увеличение величины медленных флюктуаций с ростом частоты при $L = 140$ м (фиг. 7); данный эксперимент проводился при размахе ветровой волны до 20 см. На самой низкой частоте ($f = 720$ гц) величина флюктуаций была наименьшей, затем с повышением частоты флюктуации возросли, причем разброс

экспериментальных точек увеличился. Таким образом, влияние нерегулярной верхней границы слоя с ростом частоты возрастало.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы: при распространении в водном слое тональных сигналов, длина волны которых сравнима с глубиной места, наблюдаются медленные флюктуации фазы, возникающие при наличии сейшевых колебаний поверхности водохранилища. С ростом частоты величина этого вида флюктуаций фазы уменьшается.

В заключение автор выражает благодарность научному руководителю С. Н. Ржевкину и В. С. Нестерову за ценные советы при выполнении настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. R. Merian. *Über die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefäßen*. Basel, 1928.
2. Л. Н. Захаров. Распространение тональных сигналов в плоском слое воды с волнующейся поверхностью. *Акуст. ж.*, 1960, 6, 4, 454—461.

Кафедра акустики Московского
государственного университета

Поступила в редакцию
20 сентября 1961 г.