



**КЕСОВА Л.А.**, докт. техн. наук, проф., НТУ України  
"Киевский политехнический институт",  
**АНАХОВ П.В.**, инж. ОП "Информационно-технологический центр"  
ГП "НЭК "Укрэнерго", г. Киев

## ЗАЩИТА ВОДОХРАНИЛИЩ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙШЕВЫХ ВОЛН

Целью статьи является разработка методов снижения возможного ущерба от сейши, для которых характерны определяемые временными обстоятельствами как положительные, так и отрицательные черты. Водохранилище рассматривается в качестве генератора сейшевых колебаний. Начальные условия формирует регулярный водообмен за счет внешних воздействий и волн притока/вытекания (сброса/подъема).

Предотвращение возбуждения сейши, и раскачки затухающих сейши выполняется корректировкой чувствительности водохранилища к возбуждению сейшевых волн. Подавление сейши выполняется за счет введения в систему генерирования сейшевых волн отрицательной обратной связи, функции которой выполняют водопропускные сооружения. Во избежание экстремальных колебаний уровня воды, цунамигенных и сейсмогенных резонансов, а также учитывая такое принципиально полезное свойство сейши, как перемешивание водных масс, предлагается вместо подавления сейши использовать качание их частоты.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** возбуждение сейши; качание частоты сейши; подавление сейши; раскачка сейши; тип стоячих волн; тягун; характеристики стоячих волн.

**В**ведение. В прибрежных, частично закрытых, бассейнах (заливы, бухты, фьорды, порты, гавани) возникают стоячие волны – тягун и сейши. Их профиль изменяется во времени между узлами поступательного движения, а амплитуда колебаний уровня изменяется вдоль длины волны, достигая пика в пучностях [1–3].

В Табл. 1 представлена сравнительная характеристика стоячих волн обоих типов.

Тягун наносит значительный экономический ущерб многим портам. Однажды, в нефтяной гавани Батумского порта, колебания пришвартованного к стенке крупнотоннажного судна привели к обрыву швартовых. После закрепления судна на усиленные швартовы и цепи были вырваны причальные тумбы. В порту Кейптаун судно водоизмещением 14 200 т получило серьезные повреждения борта. Суда, стоящие в Мадрасском порту, часто теряют швартовы и получают повреждения [5].

Основными действиями по снижению экономического ущерба от тягуна являются [1, 3]:

- снижение амплитуды колебаний за счет ком-

поновки и типа оградительных сооружений порта (учитываются рефракция и дифракция волн произвольной длины, полное или частичное отражение волн, влияние неоднородного рельефа дна, трение о дно и гидравлические опоры сооружений);

- разработка новых способов швартовки судов (или швартовых устройств);
- повышение точности гидрометеорологических прогнозов.

В случаях же возбуждения волн прекращаются посадка и высадка пассажиров, перегрузочные работы, а судно отводят на рейд [1, 5].

Считается, что сейши, в отличие от тягуна, в основном не несут в себе какой-либо угрозы имуществу и безопасности населения приморских районов [5].

**Постановка проблемы.** Однако обстоятельства могут определять временную нежелательность сейш (Рис. 1).

Сейши порождают течение, направление которого изменяется синхронно со сменой полупериода стоячих волн. В некоторых случаях скорости сей-

Таблица 1. Сравнительная характеристика стоячих волн водоемов

Параметр	Тягун	Сейши
Повторяемость	Неравномерная – характерная сезонная или годовая изменчивость не обнаружена [4]	Являются обычным состоянием любого водоема [5, 6]
Наблюденная частота колебаний	- 12-120 цикл/час [3]; - 6,7-120 цикл/час [7]	- 0,038-1,364 цикл/час [8]; - 0,070-30 цикл/час [9]
Наблюденная амплитуда колебаний	- до 4-х м [3]; - 10-12 см, иногда до 1,5 м [7]	- 0,9-1,2 м [5]; - может превышать 1,5 м [10]
Причины возбуждения	В результате резонанса собственных колебаний акватории водоема с внешними инфрагравитационными волнами, которые возникают в штормовой зоне моря [1, 2, 4]	В результате резонанса собственных колебаний акватории водоема с одиночной длиннопериодной волной [2, 5, 8]
Продолжительность действия	- может длиться несколько суток, при наличии противоположно направленных прогрессивных волн [4]; - затухание происходит в основном за счет излучения через устье гавани [2]	- могут долго не прекращаться, что обусловлено раскачкой затухающих волн [6, 11]; - потери энергии в основном связаны с диссипацией [2] (вследствие трения амплитуда сейш со временем уменьшается и колебания затухают [5])
Условия возникновения	Полузакрытые водоемы – гавани, заливы и т.д. [2, 4]	Закрытые и полузакрытые водоемы [2, 5]

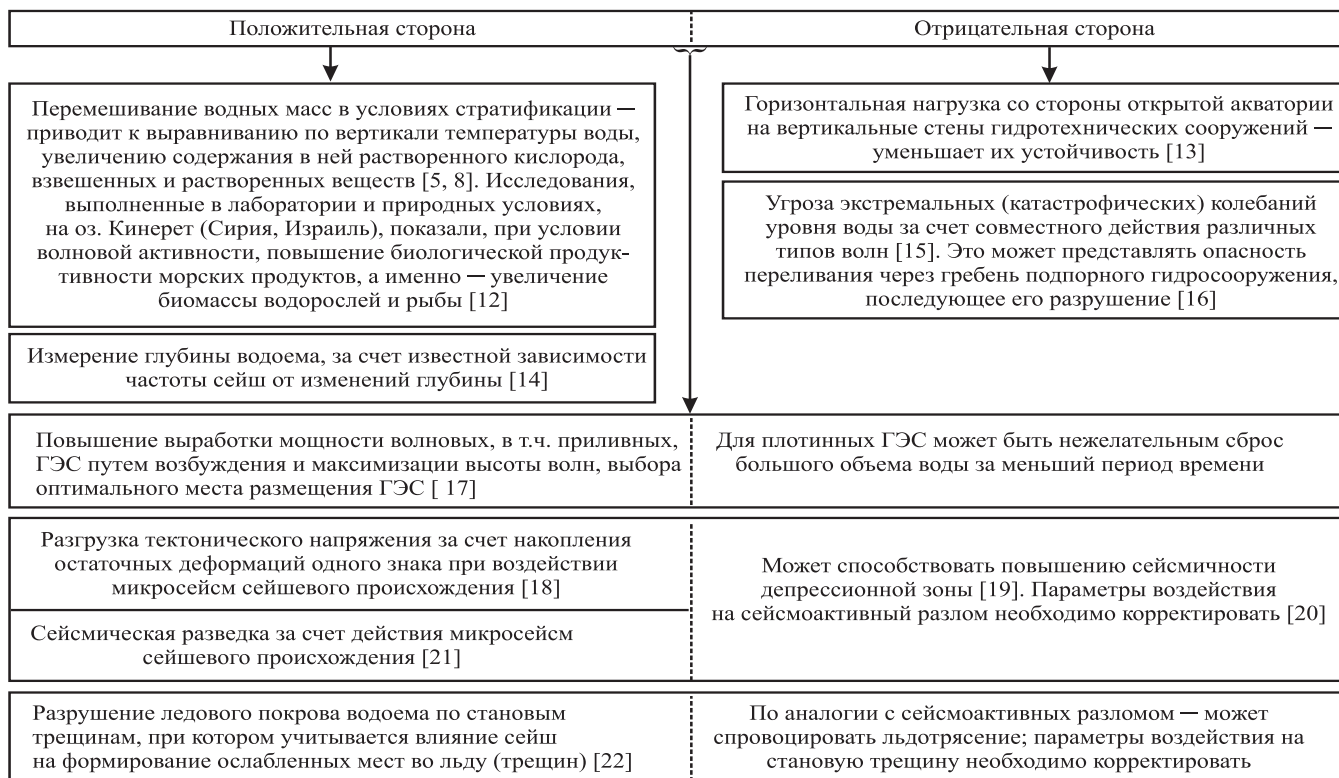


Рис. 1. Положительные и отрицательные стороны сейшевого волнения

шевых течений достигают значительных величин. Например, вызванное сейшами в Якимварском заливе Ладожского озера течение достигало 78 см/с при среднем значении 55 см/с. Сильное течение зарегистрировано в заливе Конджурор Большого Медвежьего озера (Канада). Южный вход в этот залив имеет ширину 360–450 м и глубину несколько морских саженей (1 сажень равна 1,8288 м). В узком входе в залив движение воды уподобляется речному потоку, который движется со скоростью 1,8–2,7 м/с [5]. Положительные и отрицательные стороны сейшевых течений представлены на Рис. 2.

**Цель.** Разработка методов снижения возможного ущерба от сейш.

**Методология.** В общем случае водохранилище рассматривается в качестве генератора сейшевых колебаний вида:

$$A_S(t) = A_S^{\max} \sin(n \omega_S t + \varphi_S) \exp(-2\delta \omega_S t),$$

$$n = \overline{1; n}, \quad (1)$$

где  $A_S(t)$  — мгновенная амплитуда сейшевой волны в пучности в момент времени  $t$ ;  $A_S^{\max}$  — максимальная амплитуда;  $\sin(n \omega_S t + \varphi_S)$  — уравнение гармонического колебания;  $\omega_S = 2\pi f_S$ ,  $f_S$ ,  $\omega_S$  — циклическая частота, линейная частота и фаза сейш, соответственно;  $\exp(-2\delta \omega_S t)$  — закон затухания колебаний;  $\delta$  — логарифмический декремент затухания.

Начальные условия формирует регулярный водообмен в водохранилище за счет внешних воздействий и волн притока/вытекания (сброса/подъема). Амплитуду сейшевой волны  $A_S$ , воз-

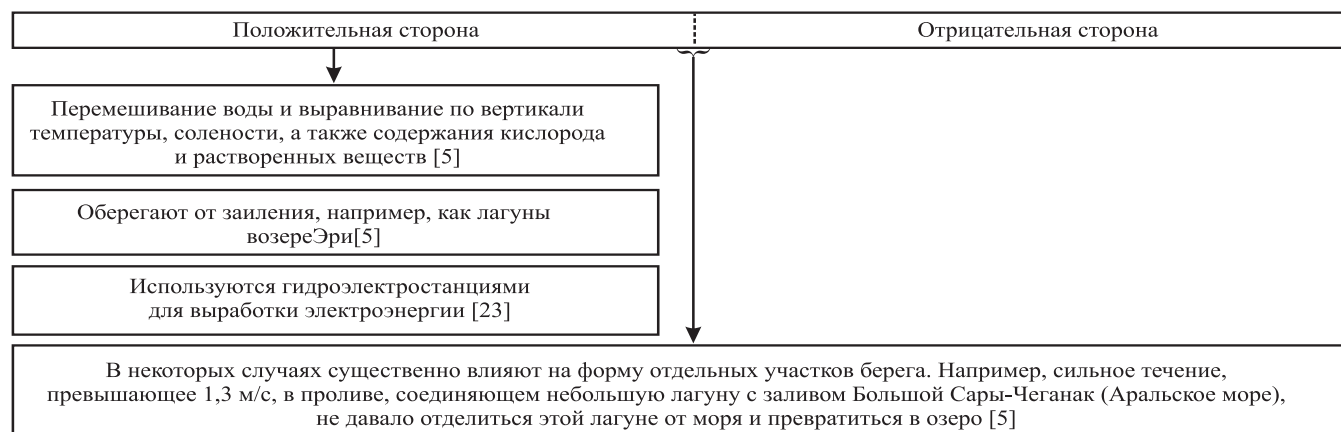


Рис. 2. Положительные и отрицательные стороны сейшевых течений



бужденной внешней волной частотой  $f_{out}$ , можно рассчитать по формуле [2]:

$$A_S = \left\{ \left[ 1 - \frac{f_{out}}{f_S} \right]^2 + Q^{-2} \left[ \frac{f_{out}}{f_S} \right]^2 \right\}^{-1/2} \quad (2)$$

где  $Q$  – добротность водоема, которая определяет потери энергии в колебательной системе и ширину полосы частот резонанса.

**Предотвращение возбуждения (раскачки) сейш** выполняется корректировкой чувствительности водохранилища к возбуждению сейшевых волн. Для этого можно изменять добротность водоема  $Q$ , частоты сейш  $f_S$  и внешней волны  $f_{out}$  (см. формулу (2)).

Для возбуждения сейш необходимы внешние воздействия частотой  $f_{out} \approx f_S$ ,  $n = \overline{(1;n)} \vee \overline{(1;1/n)}$ , затем исчезающие или ослабевающие. Причинами, порождающими сейши, могут быть длиннопериодные волны – приливные; сгонно-нагонные колебания уровня; волны, порождающиеся потоками впадающих и вытекающих рек; волны, возникающие вследствие резкого изменения атмосферного давления в различных частях водоема и т.д. [5, 8].

Своевременное реагирование на возможное возбуждение волны обеспечивается гидрометеорологическим прогнозом.

Искусственным путем возбуждение сейш достигается при управлении водопропускным (водобросным или водоподъемным) гидросооружением. Возбуждающая волна формируется за счет установки определенного интервала времени сброса или подъема воды  $T_{out} = 1/f_S$  при управлении водопропускными гидросооружениями [17].

Предотвращение возбуждения сейш может быть достигнуто установкой времени пропуска воды  $T_{out} \neq 1/f_S$ .

Частота сейш зависит от глубины водоема. Эффект  $f_S(D)$  можно объяснить обобщенной формулой Мериана для прямоугольного бассейна с горизонтальным дном [18]:

$$f_S^{ab}(t) = \frac{\sqrt{g D(t)}}{2} \sqrt{\left( \frac{a}{L(t)} \right)^2 + \left( \frac{b}{W(t)} \right)^2}, \quad (3)$$

$L(t) = \text{const}, W(t) = \text{const},$

где  $f_S(t)$  – мгновенная частота сейшевых колебаний в момент времени  $t$ ;  $a = \overline{1;a}$ ,  $b = \overline{1;b}$  – количество узлов продольной и поперечной сейш, соответственно;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $D(t)$ ,  $L(t)$ ,  $W(t)$  – законы изменения глубины, длины и ширины бассейна.

Предотвращение возбуждения сейш может

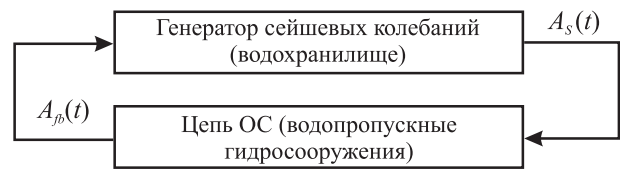


Рис. 3. Блок-схема системы генерирования сейшевых волн

быть достигнуто регулированием глубины водохранилища, при выполнении условия  $f_S(D) \neq f_{out}$ .

**Подавление сейш** выполняется за счет введения в систему генерирования сейшевых волн петли отрицательной обратной связи (Рис. 3).

Изменение выходного сигнала системы (амплитуды колебаний сейш  $A_S(t)$ ) приводит к такому изменению входного сигнала (амплитуды волны пропуска  $A_{fb}(t)$ ), которое противодействует первоначальному изменению.

Функции петли отрицательной обратной связи выполняют водопропускные гидросооружения, колебания волны на выходе которой изменяются по закону:

$$A_{fb}(t) = A_S^{\max} \sin(n\omega_S t + \pi), \quad (4)$$

где  $\pi$  – сдвиг фазы волны пропуска относительно сейшевой волны.

**Качание частоты сейш.** Во избежание экстремальных колебаний уровня воды, цунамигенных и сейсмогенных резонансов с близкими по частоте колебательными процессами не сейшевого происхождения, а также учитывая такое принципиально полезное свойство сейш, как перемешивание водных масс, представляется перспективным в некоторых случаях вместо подавления сейш использовать качание их частоты [21].

Было показано, что сейшевые колебания затухают по экспоненциальному закону  $\exp(-2\delta\omega_S t)$ . При возбуждении затухающих сейш несинфазной волной такой же частоты получаем суммарный сигнал вида

$$A_{res}(t) = A_S(t) + A_{out}(t), \quad f_S = f_{out}, \quad \varphi_S \neq \varphi_{out}, \quad (5)$$

где  $A_{out}$ ,  $\varphi_{out}$  – амплитуда и фаза раскачивающей волны, соответственно.

Несогласованность затухающей и раскачивающей волн по фазе приводит к фазовой модуляции затухающей сейшевой волны. На Рис. 4 показано возбуждение затухающих сейш несинфазной волной такой же частоты, на фоне стационарных гармонических колебаний.

При смещении возбуждающей волны на угол, меньший за полупериод ( $0 < (\Delta\varphi = \varphi_{out} - \varphi_S) < \pi$ , где  $0^\circ \leq \Delta\varphi \leq 360^\circ$  – сдвиг фаз), частота результирующей волны  $f_{res}$  падает, а затем постепенно восста-

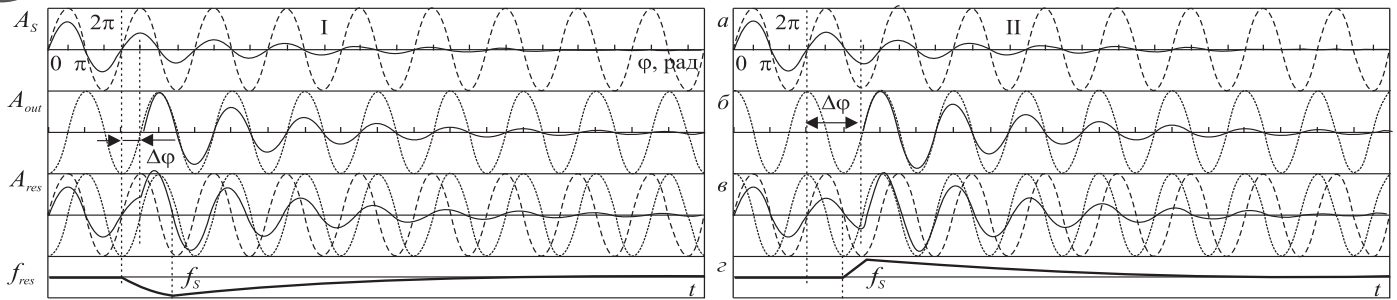


Рис. 4. Возбуждение затухающих сейш несинфазной волной, со сдвигом фазы  $\Delta\varphi_{out} = \varphi_{out} - \varphi_s = \pi/2$ , (I),  $\Delta\varphi_{out} = 3\pi/2$ , (II). Амплитуды: а – затухающей сейшевой волны; б – возбуждающей волны; в – результирующей сейшевой волны; г – качание частоты результирующей волны

навливается. При смещении возбуждающей волны на угол, большей за полупериод ( $\pi < \Delta\varphi < 2\pi$ ), частота результирующей волны  $f_{res}$  вначале возрастает.

**Выводы.** Исследованы два типа стоячих волн водоемов – тягун и сейши. Выработаны критерии их оценки (повторяемость; наблюдаемые частота и амплитуда колебаний; причины возбуждения и продолжительность действия; условия возникновения) и представлена сравнительная характеристика.

Определены положительные и отрицательные качества сейш. Учитывая, что обстоятельства могут определять временную нежелательность сейш, разработаны методы их нейтрализации.

Предотвращение возбуждения сейш, и раскочки затухающих сейш выполняется корректировкой чувствительности водохранилища к возбуждению сейшевых волн.

Подавление сейш выполняется за счет введения в систему генерирования сейшевых волн петли отрицательной обратной связи, функции которой выполняют водопропускные сооружения.

Качание частоты сейш выполняется за счет сдвига по фазе раскачивающей волны по отношению к затухающей.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Глявлина Г.В. Влияние компоновки и типа ограждающих сооружений на резонанс инфрагравитационных волн в портовых акваториях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07. – М., 2006. – 19 с.
2. Rabinovich A.B. Seiches and Harbor Oscillations / Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. by Y. C. Kim). – Singapore: World Scientific Publ., 2009. – P. 193–236.
3. Юхт Л.В. Эксплуатация морских портов в условиях тягуноопасных явлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. – М., 2005. – 20 с.
4. Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание / Под ред. Е. С. Нестерова. – М.; Обнинск: "ИГ-СОЦИН", 2009. – 287 с.
5. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря / Н.А. Лабзовский. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 238 с.
6. McNamara D.E. Seismically observed seicheing in the Panama Canal / D.E. McNamara, A.T. Ringler, C.R. Hutt, L.S. Gee // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2011. – Vol. 116, Iss B4. – 12 p.
7. Специализированные прогнозы погоды. – Л.: Изд. ЛГМИ, 1991. – 112 с.
8. Арсеньева Н.М. Сейши на озерах СССР / Н.М. Арсеньева, Л.К. Давыдов, Л.Н. Дубровина, Н.Г. Конкина. – Л.:

- изд-во Ленинградского университета, 1963. – 184 с.
9. Kodomari S. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion / S. Kodomari // Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 7 (Geophysics). – 1982. – Vol. 7, No. 2. – P. 185–226.
10. Матишов Г.Г. Численные исследования сейшевых колебаний уровня Азовского моря / Г. Г. Матишов, Ю. И. Инженейкин // Океанология. – 2009. – Т. 49, № 4. – С. 485–493.
11. Breaker L.C. On the natural oscillations of Monterey Bay: Observations, modeling, and origins / L.C. Breaker, Y.-h. Tseng, X. Wang // Progress in Oceanography. – 2010. – Vol. 86, Iss. 3-4. – P. 380–395.
12. Ostrovsky I. Seiche-induced mixing: Its impact on lake productivity / I. Ostrovsky, Y. Z. Yacobi, P. Walline, I. Kalikhman // Limnology and Oceanography. – 1996. – Vol. 41, Iss. 2. – P. 323–332.
13. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*.
14. Анахов П.В. Вимірювання глибини водою методом власних коливань / П. В. Анахов, О. В. Анахова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 36–40.
15. Рабинович А.Б. Длинные волны в океане: захват, резонанс и морские природные катастрофы: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 11.00.08. – М., 1997. – 27 с.
16. Balmforth N.J. Dam breaking seiches / N. J. Balmforth, J. von Hardenberg, R.J. Zammett // Journal of Fluid Mechanics. – 2009. – Vol. 628. – Pp. 1–21.
17. Анахов П.В. Підвищення виробітку потужності гідроелектростанцій за рахунок енергії сейшів / П. В. Анахов // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 3 (37). – С. 51–55.
18. Анахов П.В. Використання мікросейсмогенних явищ для розвантаження тектонічних напружень / П. В. Анахов // Геофізический журнал. – 2014. – Т. 36, № 5. – С. 128–142.
19. Talwani P. On the Nature of Reservoir-induced Seismicity / P. Talwani // Pure and Applied Geophysics. – 1997. – Vol. 150, Iss. 3-4. – Pp. 473–492.
20. Патент Российской Федерации №2273035, МКИ G01V 9/00. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов: Псахье С. Г., Попов В. Л., Шилько Е. В., Астафуров С. В., Ружич В. В., Смекалин О. П., Борняков С. А. – № 2004108514/28; Заявлено 22.03.2004.
21. Анахов П.В. Сейсмічна розвідка методом хитної частоти / П. В. Анахов // Геоінформатика. – 2015. – № 2 (54). – С. 46–51.
22. Анахов П. Високоточне руйнування льодового покриву водою / П. Анахов // Водне господарство України. – 2014. – № 3 (111). – С. 22–24.
23. Patent 4464080 USA, Int. Cl. E 02 B 9/08; F 03 B 13/12. High volume tidal or current flow harnessing system / Gorlov A.M. – Appl. No.: 338482; 11.01.1982; Publication 07.08.1984.