

# АППАРАТУРНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ И ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ К.К. ЗАПОЛЬСКОГО

А.Я. Сидорин

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

**Аннотация.** В 2011 г. исполняется 95 лет со дня рождения талантливого геофизика со сложной судьбой Константина Константиновича Запольского (1916–1992). В 1942 г. в результате производственной травмы К.К. Запольский потерял зрение, но несмотря на это продолжал активно работать. Диапазон его научных интересов был чрезвычайно широк – от создания принципиально новых измерительных средств и физически обоснованных методов сейсмологических исследований до оригинальных работ по физике очага землетрясений. В результате многолетних и глубоких по содержанию исследований К.К. Запольский первым в мировой геофизической практике стал с успехом широко использовать анализ частотно-временных полей сейсмических колебаний, возникающих при сильных землетрясениях. Основу предложенного К.К. Запольским метода составляло спектрально-временное разложение сейсмического процесса, получаемое инструментальным способом с помощью разработанной им аппаратуры – частотно-избирательных сейсмических станций (ЧИСС). При этом сигнал отображался в виде функции трех переменных – времени, частоты и амплитуды, причем каждый из этих параметров имел существенное значение для описания физических параметров исследуемого процесса. К.К. Запольский предложил определять сейсмический момент землетрясения в виде спектрально-временной функции очагового излучения, что позволило вести оперативное определение момента непосредственно в процессе регистрации землетрясений. Важным элементом предложенного К.К. Запольским принципиально нового подхода к сейсмологическим исследованиям было наличие разработанных автором оригинальной аппаратуры, а также не имевших в то время аналогов в мировой практике методов обработки и интерпретации данных. Работы К.К. Запольского намного опередили свое время, а сейчас спектральные методы анализа сейсмических колебаний, для развития которых так много он сделал, занимают ведущее место в сейсмологических исследованиях.

**Ключевые слова:** К.К. Запольский, сейсмология, сильные землетрясения, спектральный анализ, спектры землетрясений, частотно-временные поля.

## Литература

- Введенская Н.А.* Исследование глубоких землетрясений Средней Азии: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Геофиз. ин-т, 1952.
- Введенская Н.А.* Выделение волны  $sP$  на записях глубоких землетрясений Средней Азии // Тр. Геофиз. ин-та. 1956. № 36(163). С.25–34.
- Введенская Н.А.* Землетрясения Средней Азии // Землетрясения в СССР. 1961. С.278–313.
- Введенская Н.А.* К вопросу об использовании данных о слабых землетрясениях для задач сейсмического районирования // Бюл. Совета по сейсмол. АН СССР. 1960. № 8. С.60–66.
- Введенская Н.А.* Методика и результаты обобщения наблюдений сети стационарных сейсмических станций Средней Азии за 1950–1953 гг. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. № 6. С.497–514.
- Введенская Н.А.* По поводу обобщения наблюдений стационарных сейсмических станций Средней Азии // Тр. Геофиз. ин-та. 1955б. № 30(157). С.137–141.
- Введенская Н.А.* О работе сейсмических станций Кавказа // Информ. бюл. Комиссии по сейсмич. службе при Совете по сейсмол. АН СССР. 1962а. № 5. С.13–16.
- Введенская Н.А.* О связи во времени между изменением во времени сейсмической активности близко расположенных эпицентральных зон // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 11. С.1394–1398.
- Введенская Н.А.* О точности определения положения очага землетрясения методом засечек // Тр. Геофиз. ин-та. 1955а. № 30(157). С.127–136.
- Введенская Н.А.* Об использовании инструментальных наблюдений за слабыми землетрясениями при сейсмическом районировании // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1958. № 2. С.210–224.

- Введенская Н.А.* Обобщение сейсмостатистических данных при сейсморайонировании территории Средней Азии // Вопросы инженерной сейсмологии. 1962б. С.25–45. (Тр. ИФЗ АН СССР; 22(189).
- Введенская Н.А., Растворова В.А.* Новейшая тектоника и сейсмичность Большого Кавказа// Сейсмоструктура Альпийского складчатого пояса юга СССР и некоторых сопредельных территорий. М.: Наука, 1974. С.6–19.
- Введенская Н.А., Фогель А.А.* О карте эпицентров Северного Тянь-Шаня // Бюл. Совета по сейсмол. АН СССР. 1957. № 3. С.106–112.
- Вешняков Н.В., Кирнос Д.П.* Об одном видоизменении голицынской схемы гальванометрической регистрации // Тр. Сейсмологического института АН СССР. № 119. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1947. С.97–104.
- Голицынъ Б.Б.* Лекции по сейсмометрии. СПб.: Типография Императорской Академии наук, 1912. 654 с.
- Добровольский И.П.* Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
- Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И.* Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений // Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980. С.7–14.
- Запольский К.К.* Результаты некоторых исследований сейсмографов для регистрации отраженных волн // Тр. Сейсмол. ин-та. 1941. № 106. С.57–59.
- Запольский К.К.* Аппаратура и методика исследования физических характеристик сейсмических волн в реальных средах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ АН СССР, 1952.
- Запольский К.К.* О динамических годографах сейсмических волн // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1955. № 3. С.198–206.
- Запольский К.К.* Октавный фильтр // Информационно-технический бюллетень МРТП. 1956. № 1.
- Запольский К.К.* Опыт изучения частотных спектров землетрясений Средней Азии методом частотно-избирательной сейсмометрии: Отчет Таджикской комплексной экспедиции за 1954–1956 гг. Т. 2. М; Гарм: ИФЗ АН СССР, 1957 // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.41–65.
- Запольский К.К.* Измерения уровня и спектрального состава короткопериодных микросейсм // Вопросы инженерной сейсмологии. 1960. Вып. 3 С.153–164.
- Запольский К.К.* Частотно-избирательные сейсмические станции ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971а. С.20–36.
- Запольский К.К.* Спектральный состав сейсмических волн слабых местных землетрясений // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971б. С.180–190.
- Запольский К.К.* Частотно-временные поля и динамические характеристики очаговых функций сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210, № 6. С.1338–1341.
- Запольский К.К.* Частотно-временная трактовка магнитуды  $m_{PV}$  на примере Монеронского землетрясения 5.IX.1971 г. // Докл. АН СССР. 1974. Т. 214, № 4. С.796–799.
- Запольский К.К.* О механизме источника землетрясения как процессе очагового разрыва по данным частотно-временной сейсмометрии // Достижения и проблемы современной геофизики. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. С.124–135.
- Запольский К.К.* Особенности временного хода высвобождения энергии в процессе развивающегося очагового разрыва // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 9. С.94–97.
- Запольский К.К., Гостев М.А.* Частотно-избирательная сейсмическая станция ЧИСС-1957 (аппаратура и ее полевые испытания в ТКСЭ): Отчет за 1957 год. Ч. 1. М.: ИФЗ АН СССР, 1957 // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.7–40.
- Запольский К.К., Жигальцев А.А.* Уровень микросейсм в районе города Обнинска: Краткий отчет о спектральных сейсмометрических наблюдениях 1962 г.: Фонды ИФЗ АН СССР, 1962. 9 с.
- Запольский К.К., Логинова Г.М.* Некоторые результаты частотно-временного изучения землетрясений аппаратурой ЧИСС // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1983. С. 38–51.

- Запольский К.К., Логинова Г.М.* О возможности оценки сейсмического воздействия сильных землетрясений на инженерные сооружения по телесеismicким частотно-временным полям // Геолого-геофизическое изучение сейсмоопасных зон / Материалы Всесоюз. сессии 2–6 сент. 1981 г., КиргССР, Фрунзе, 1984. Фрунзе, 1984а. С.219–226. // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.83–86.
- Запольский К.К., Логинова Г.М.* Особенности сильных мелкофокусных землетрясений Таджикистана // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984б. № 4. С.83–89.
- Запольский К.К., Логинова Г.М.* Афтершоковая модель цикла сейсмической активности при изучении прочностных свойств среды в очаговом объеме большого землетрясения // Докл. АН ТаджССР. 1988. Т. 31, № 1. С. 29–32. 1964 // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.87–90.
- Запольский К.К., Логинова Г.М.* Прочностные свойства среды в гипоцентральной зоне большого землетрясения в процессе магистрального разрыва и последующих толчках // Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения. М.: Наука, 1989. С.20–26.
- Запольский К.К., Логинова Г.М.* Прочностные свойства среды в очаговой зоне большого землетрясения в процессе магистрального разрыва и при последующих толчках // Комплексные исследования по сейсмологии и сейсмостойкому строительству. М., 1991. С.86–93.
- Запольский К.К., Мельникова И.М.* Спектральный состав близких землетрясений по данным частотно-избирательной станции: Отчет Гармской экспедиции за 1952 г. Фонды ИФЗ АН СССР, 1953.
- Запольский К.К., Нерсесов И.Л.* Особенности временного хода высвобождения энергии в процессе развивающегося очагового разрыва // Европейская сейсмологическая комиссия. XIX Генеральная ассамблея: Тез. докл. Москва, 1–6 октября 1984 г., М., 1984. С.53.
- Запольский К.К., Соловьева Р.П.* Спектральные характеристики сильного землетрясения на Аляске 28 марта 1964 г. и его афтершоков // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971. С.152–163.
- Запольский К.К., Халтурин В.И.* Частота сейсмических колебаний // Методы детального изучения сейсмичности. Гл. 5: Тр. ИФЗ АН СССР. М., 1960. № 9(176). С.115–161.
- Запольский К.К., Е.С. Борисевич, Гальперин Е.И.* Опытная передвижная низкочастотная сейсмическая станция // Тр. ГЕОФИАНа. 1955. № 29(156). С.3–10.
- Запольский К.К., Харин Д.А., Кузьмина Н.В., Данилова Т.И., Жигальцев А.А.* Измерение спектрального состава скорости колебаний грунта частотно-избирательными станциями ЧИСС // Сейсмический эффект внутренних (камуфлетных) взрывов. Гл. 3. М.: ИФЗ АН СССР, 1964 // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.66–82.
- Запольский К.К., Жбрыкунова Н.А., Жбрыкунов В.Я., Логинова Г.М.* Спектральный состав Р-волн сильных землетрясений (по данным станции Обнинск) // Землетрясения в СССР в 1969. М.: Наука, 1973а. С. 220–227.
- Запольский К.К., Жбрыкунова Н.А., Жбрыкунов В.Я.* Спектральный состав Р-волн сильных землетрясений (по данным станции Обнинск) // Землетрясения в СССР в 1970 г. М.: Наука, 1973б. С.210–214.
- Запольский К.К., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И.* Физические основы магнитудной классификации землетрясений // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974а. Т. 1. С.79–131.
- Запольский К.К., Жбрыкунова Н.А., Жбрыкунов В.Я., Логинова Г.М.* Спектральный состав Р-волн больших землетрясений по данным станции ЧИСС в Обнинске // Региональные исследования сейсмического режима. Кишинев: Штиинца, 1974б. С.188–200.
- Запольский К.К., Захарова А.И., Чепкунас Л.С., Жбрыкунова Н.А., Жбрыкунов В.Я., Левкина Т.Г.* Дополнительные параметры очагов сильных землетрясений // Землетрясения в СССР в 1975 г. М.: Наука, 1978а. С.133–140.

- Запольский К.К., Жбрыкунова Н.А., Жбрыкунов В.Я.* Спектральные и временные характеристики *P*-волн сильных землетрясений в 1974 г. (по данным ЧИСС в ЦСО Обнинск) // Землетрясения в СССР в 1975 г. М.: Наука, 1978б. С.141–146.
- Запольский К.К., Логинова Г.М., Медведева Е.В.* Спектральные и временные характеристики *P*-волн по данным ЧИСС (ЧИСС-спектры и размеры очагов) // Землетрясения в СССР в 1977 г. М.: Наука, 1981. С.131–141.
- Нерсесов И.Л., Николаев А.В.* К вопросу о зависимости преобладающих частот при взрывах от величины заряда // Физика землетрясений и сейсмика взрывов. М.: ИФЗ АН СССР, 1962. С.95–100. (Тр. ИФЗ АН СССР; № 25 (192)).
- Сидорин А.Я.* Б.Б.Голицын и революция в сейсмометрии в начале XX века // Сейсмические приборы. 2002. Вып. 38. С.70–88.
- Тарасов Г.Г.* Работа под руководством К.К. Запольского // К.К. Запольский. Частотно-временные исследования сейсмических колебаний. Т. 2 / Сост.: Е.В. Медведева, А.Я. Сидорин, Р.П. Соловьева. М.: ИФЗ РАН, 2007. С.125–128.
- Цубои Ч.* Энергия землетрясений, объем гипоцентральной области, площадь афтершоков и прочность земной коры // Слабые землетрясения. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. С.160–164.
- Шнирман Г.Л.* Электрические методы интегрирования и дифференцирования // Тр. Сейсмол. Ин-та. 1940. № 105.
- Шнирман Г.Л.* Электромагнитный сейсмометр высокой чувствительности // Тр. Сейсмол. Ин-та. 1941. № 106. С.54–56.
- Шнирман Г.Л.* Аппаратурные наблюдения. Избранные труды. М.: ОИФЗ РАН, 2003. 304 с.
- Brady B.T.* Theory of earthquakes. 2. Inclusion theory of crustal earthquakes // Pure and Applied Geophys. 1975. V. 113, N 1/2. P.149–169.
- Bune V.I., Vvedenskaya N.A., Gorbunova I.V., Zapolsky K.K., Kondorskaya N.V., Fedorova I.V.* To the problem of earthquake magnitudes determination // Pure and Appl. Geophys. 1973. V. 103, N 2. P.350–361.
- Grant J.A., Mansinha L.* Seismic magnitude from Fourier analysis // Bull. Seism. Soc. Amer. 1977. V. 67. P.453–461.
- Hanks T.C., Kanamori H.* A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P.2348–2350.
- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P.2981–2987.
- Kanamori H.* Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophysics. 1983. V. 93. P.185–199.
- Nortmann R., Duda S.J.* Determination of spectral properties of earthquakes from their magnitudes // Tectonophysics. 1983. V. 93. P.251–275.
- Ottmoller L., Havskov J.* Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra // Bull. Seism. Soc. Amer. 2003. V. 93, N 1. P.203–214.
- Zapolsky K.K., Nersesov I.L.* Peculiarities of the energy release time course in the process of developing focus rupture // XIX Gen. Ass. ESC, Moscow, October 1–6, 1984. М.: Nauka, 1984. P.76.