© Л.Л. Федорова, К.О. Соколов, 2008

УДК 622.1

Л.Л. Федорова, К.О. Соколов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

Семинар № 1

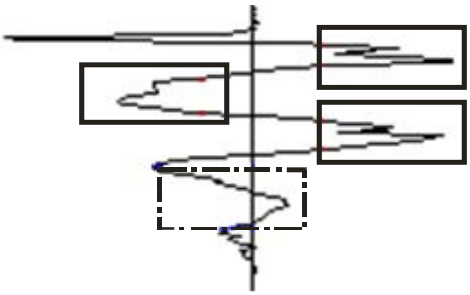
Дистанционные геофизические методы позволяют получать в сжатые сроки достоверную информацию о строении и свойствах горного массива. В условиях распространения многолетнемерзлых пород достаточно эффективны методы высокочастотной электроразведки, в частности, георадиолокационный метод импульсного электромагнитного зондирования, обеспечивающий детальное исследование мёрзлых рыхлых отложений в интервале глубин 1-30 м [1].

Результативность интерпретации данных георадиолокационных исследований зависит от реализации представления данных и их количественных характеристик. Точность прогноза геологического строения объекта исследований повышается с увеличением детальности проводимой интерпретации с использованием различных методов анализа максимального количества характеристик. Разработка алгоритмов анализа георадиолокационных сигналов для максимизации получаемой информации, остается актуальной проблемой также как и автоматизация процессов обработки и интерпретации данных.

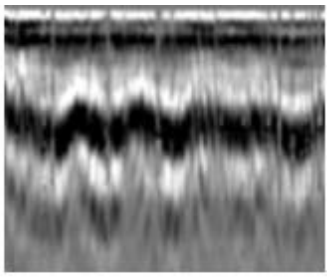
Использование георадиолокационного оборудования с диапазоном частот 30-60 МГц позволяет проводить исследования на значительной глубине, но при этом сильно снижается разрешающая способность. Для устранения этого недостатка производится дополнительное зондирование с частотами 150-400 МГц, что увеличивает общее время исследования, количество привлекаемого оборудования, техники и т.д.

При георадиолокационных исследованиях объектов с малой глубиной залегания сигнал, отраженный от их границ, накладывается на зондирующий сигнал, становясь визуально труд-но или вовсе неразличимым. Полное или частичное наложение видоизменяет сигнал, делая его более низкочастотным, ухудшая разрешающую способность георадара [2].

На рис. 1, *а* представлен типичный георадиолокационный сигнал полученный георадаром «Тритон» с центральной частотой 30 МГц [3]. Прямоугольником выделены места с ярко выраженным наложением сигналов, визуально легко различимые, но неотображаемые на георадиолокационном профиле в стандартном программном обеспечении GeoScan32 рис. 1, *б*. В данном случае произошла потеря примерно половины информации - чередование черных и белых областей радарограммы должно соответствовать количеству пар положительных и отрицательных максимумов сигнала. Пунктирным прямоугольником на рис. 1, *а* отмечено наложение, которое может распознать только оператор с большим опытом обработки,



а)



б)

Рис. 1. Георадиолокационный сигнал (а) и фрагмент профиля (б), полученные георадаром с центральной частотой 30 МГц

по небольшим неровностям в отрицательных и положительных участках сигнала. Для получения качественной интерпретации профилей, состоящих из подобных сигналов, оператор вынужден вручную отслеживать аналогичные аномалии, анализируя каждый сигнал, количество которых может достигать 4000 и более.

Для решения задачи дифференциации наложенных сигналов и повышения разрешающей способности данных, полученных низкочастотным георадаром разработана методика обработки радарограмм с применением вейвлет-анализа. Непрерывное вейвлет-преобразование широко используется в обработке сигналов и дает уникальные возможности по распознаванию локальных и «тонких» особенностей сигналов, что важно как для геофизики, так и для многих областей радиотехники, связи, радиоэлектроники и других отраслях науки и техники [4].

Английское слово wavelet (от французского «ondelette») дословно переводится как «короткая (маленькая) волна». Вейвлет-преобразование (ВП) одномерного сигнала – это его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \qquad (1)$$

сконструированных из материнского (исходного) вейвлета $\psi(t)$, обладающего определенными свойствами за счет операций сдвига во времени (b) и изменения временного масштаба (a) (рис. 2). Масштаб в вейвлет-анализе является аналогом частоты в анализе Фурье. Множитель $1/\sqrt{a}$ обеспечивает независимость нормы этих функций от масштабирующего числа a. Малые значения a соответствуют мелкому масштабу $\psi_{ab}(t)$ или высоким частотам ($\omega \sim 1/a$), большие параметры a – крупному масштабу $\psi_{ab}(t)$, т.е. растяжению материнского вейвлета $\psi(t)$ и сжатию его спектра.

На рис. 2 приведен wave-вейвлет во временной и частотной областях для трех значений масштабных коэффициентов 'a'. Форма вейвлета относится к нечетным функциям и, соответственно, спектр вейвлета является мнимым.

Уравнение вейвлета WAVE:

$$\psi(t,a,b) = \frac{-1{,}786}{\sqrt{2}} \cdot \frac{t-b}{a} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-b}{a}\right)^2\right].$$

Главной особенностью вейвлетов является - анализ сигналов на разных масштабах. На мелких масштабах мы

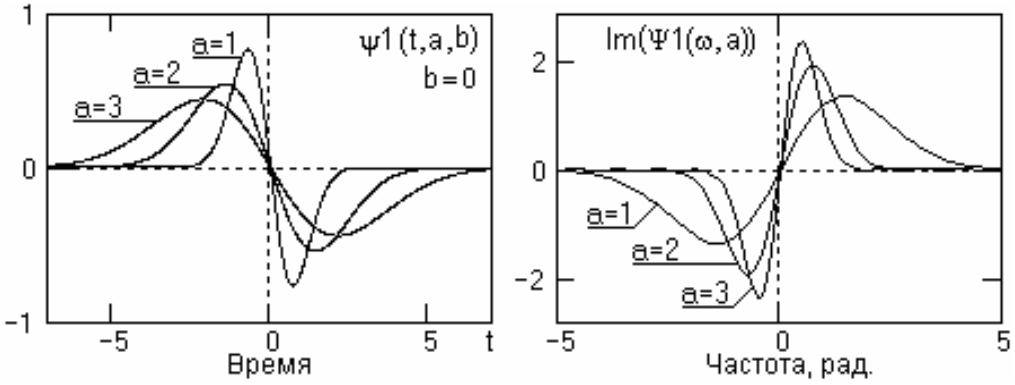


Рис. 2. Вейвлет «WAVE» во временной и частотной областях

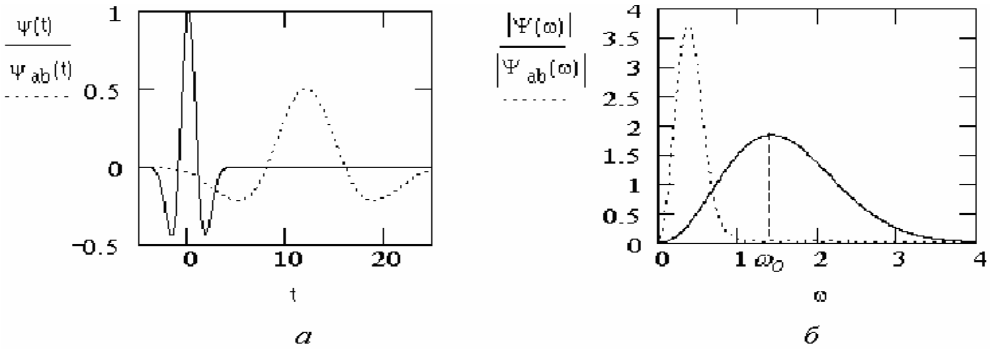


Рис. 3. Вейвлет «Мексиканская шляпа»

видим некоторые глобальные характеристики сигнала, а на крупных локальные особенности [4]. Благодаря этому свойству вейвлетов имеется возможность разделения наложенных сигналов, т.е. из одного сигнала мы можем получить, например два более высокочастотных сигнала.

Нами рассмотрена возможность многократного применения вейвлет- обработки георадиолокационного сигнала, что приводит к увеличению детализации исходного сигнала вплоть до частоты самого вейвлета. На практике избыточная детализация делает сигнал менее наглядным. Наше исследование показало, что для большинства георадиолокационных сигналов достаточно 5 повторений вейвлет-обработки для повышения разрешающей способности сигнала без потери огибающей импульса.

Многообразие вейвлетов позволяет выбрать наиболее подходящий для анализа георадиолокационных данных с целью максимального увеличения эффективности их обработки. Основной критерий выбора: вейвлет должен быть максимально приближен к классу функций описывающих сигнал, т.е. желательно чтобы форма вейвлета отражала поведение сигнала или его составляющих. Для анализа георадиолокационного сигнала нами был выбран вейвлет «Мексиканская шляпа» представленный на рис. 3, *а*, модуль его спектральной плотности показан на рис. 3, *б*.

Для повышения эффективности проведения вейвлет-анализа также необхо-

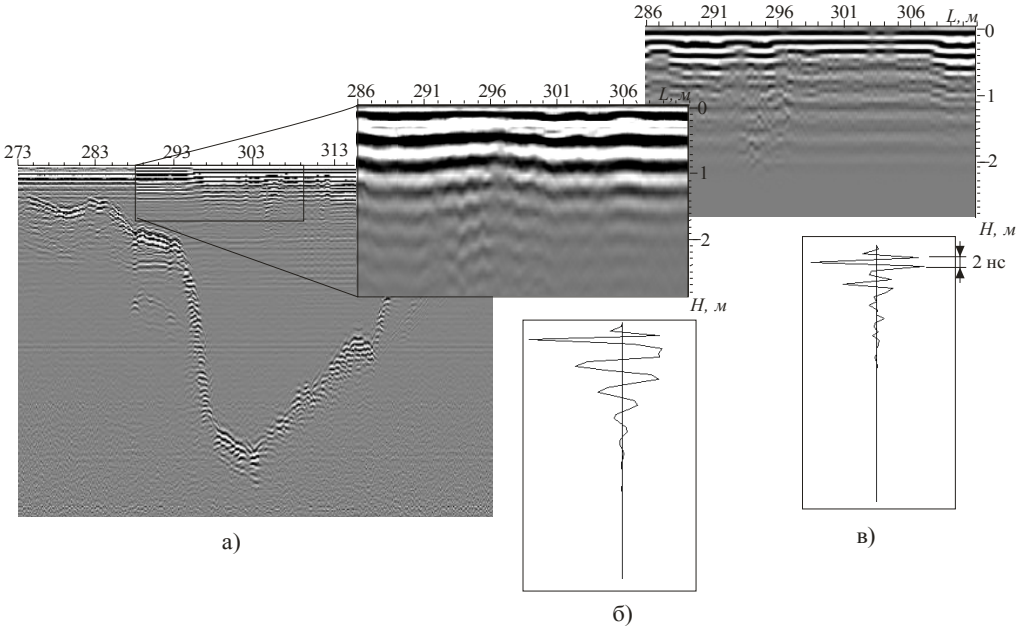


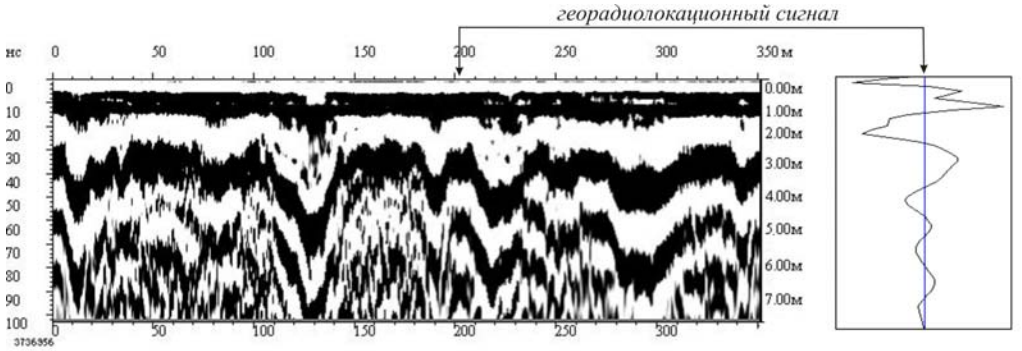
Рис. 4. Пример использования вейвлет-анализа георадиолокационных сигналов для повышения разрешающей способности при определении толщины льда

димо подобрать параметры максимально подходящие для обрабатываемого сигнала. Масштаб вейвлета и количество вейвлет-преобразований варьируется в зависимости от георадара, которым проводилось профилирование, и особенностей радарограммы. Проведенные нами исследования позволяют рекомендовать для обработки данных георадиолокации следующие параметры вейвлет-преобразования:

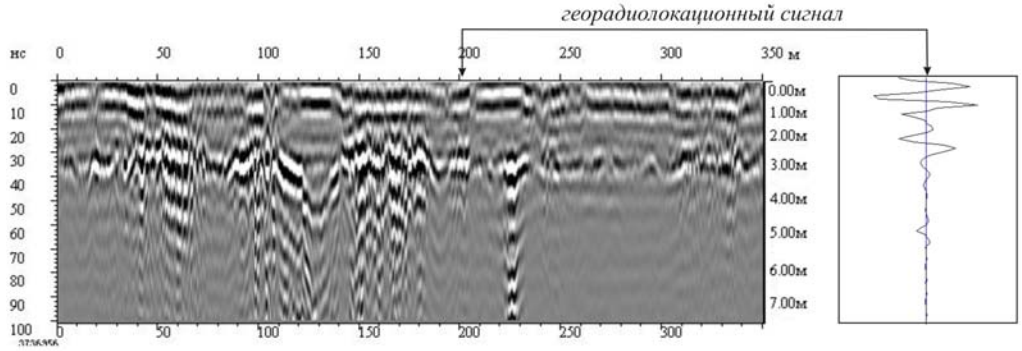
Георадар	**Масштаб (а)**	**Количество повторений**
АБ400	0,2-0,4	2-3
АБ150	0,6-0,7	3-4
«Тритон»	1,2-1,4	4-5

Пример использования вейвлет-анализа георадиолокационных сигналов для повышения разрешающей способности приведен на рис. 4. Результаты получены при зондированиях протоки р. Алазея (Якутия) со льда георадаром с частотой 400 МГц. На георадиолокационном разрезе четко прослеживается конфигурация рельефа дна и имеются отражения от границ ледяного покрова реки (рис. 4, *а*). По результатам съемки для вейвлет обработки был взят участок профиля с 286 по 310 м. Сигналы этого участка из-за отражений от шуги, уносимой стрежневой частью протоки, имеют низкочастотный спектр, сложную форму и не дают необходимую информацию о толщине льда без специальной обработки (рис. 4, *б*). Разработанным программным обеспечением проведены 3 процедуры обработки профиля вейвлетом с масштабом 0,2, что увеличило его несущую частоту до 600 МГц и позволило выявить и распознать: сигнал от верхней границы льда на уровне 2 нс и от нижней границы льда – 4 нс. Таким образом, расчетная толщина льда в стрежневой части протоки составила 16 см.

Разработанная методика обработки данных с использованием вейвлет-анализа георадиолокационных сигналов



а. Верхняя часть исходного георадиолокационного разреза



б. Герадиолокационный разрез после обработки с использованием вейвлет преобразования

Рис. 5. Результат вейвлет обработки результатов георадиолокационного зондирования мерзлых рыхлых отложений

успешно применена для обнаружения границы торфа, песков и коренных пород на россыпных месторождениях Севера.

На рис. 5, *а* представлен фрагмент верхней части георадиолокационного разреза, полученного при зондированиях георадаром АБДЛ-Тритон с частотой 30 МГц. Из-за низкочастотных сигналов на георадиолокационном разрезе на глубинах до 5 м не удается четко выделить отражающие границы. Эти сигналы являются композицией (наложением друг на друга) зондирующего импульса и отражений от границы слоев верхней части разреза.

На рис. 5, *б* представлен результат использования вейвлет-преобразования. Данные георадиолокационного разреза были 5 раз обработаны вейвлетом с масштабом 1,4. В результате георадиолокационные сигналы имеют более короткие импульсы и на разрезе можно четко выделить отражающую границу на глубине 3-3,5 м. При сопоставлении с результатами бурения данная граница определена как граница торф-песок.

В результате проведенных исследований определены оптимальные параметры вейвлет-преобразования, позволяющие повысить разрешающую способность георадиолокационного сигнала без потери информации, снизить влияние помех и выделить на их фоне полезный сигнал. Апробация разработанной методики обработки данных георадиолокации с использованием вейвлет-анализа и ее программного

обеспечения в комплексе инженерно-геологических изысканий на россыпных месторождениях показали их высокую эффективность, подтвержденную данными бурения, и простоту их использования в полевых условиях. Дальнейшее направление работ авторам видится в исследовании возможностей вейвлет-анализа георадиолокационных сигналов, вейвлет-спектрограмм для изучения свойств пород в естественном залегании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Омельяненко А.В., Федорова Л.Л.* Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород.-Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006, с.3-26.
2. *Омельяненко А.В.* Георадиолокационная технология в горно-геофизических исследованиях мерзлого горного массива // Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны: Труды межд. научно-практич. конф. 14-17 июня 2005г.- Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН.-Я., 2005.-том 1.-С.70-74.
3. *Вопросы* подповерхностной радиолокации. Коллективная монография/Под ред. А.Ю. Гринева. - М.: Радиотехника, 2005. - 416 с.
4. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории к практике. Изд. 2-е, перераб. И доп. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. - 400 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Федорова Л.Л. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Соколов К.О. – аспирант,
Институт горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 1 симпозиума «Неделя горняка-2008».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *А.М. Гальперин*

Д И С С Е Р Т А Ц И И

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
СОКОЛОВА Ольга Владимировна	Эколого-экономическое обоснование использования шахтных вод при ликвидации угледобывающих предприя-тий Восточного Донбасса	08.00.05	к.э.н.