

## Нейросетевые модели локальных годографов сейсмических волн

© М. А. Лазаренко, О. А. Герасименко, Н. Н. Остапчук, 2011

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 1 апреля 2011 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кендзерой

Для узагальнення задачі побудови годографів сейсмічних хвиль використовуються мережі штучних нейронів, котрі дозволяють створювати нелінійні моделі поля часу розповсюдження фаз сейсмічних хвиль як функцій кількох аргументів: глибини джерела, магнітуди, азимуту приходу хвилі і епіцентральної відстані. Будуються 3D годографи для трьох нових українських сейсмостанцій, наводяться відхилення змодельованих часів приходу сейсмічних хвиль від глобальних оцінок.

To generalize the problem of the travel time assessment the artificial neuron networks are used. This approach makes possible to build the nonlinear model of seismic wave phase propagation as a function of several arguments: source depth, magnitude, back azimuth and epicenter distance. The 3D travel time curves for three Ukrainian seismic stations are presented together with the deviation from global travel time data.

Построение привычных для практики наблюдений годографов сейсмических волн есть задача регрессии, использующей известное распределение систем двух случайных величин: расстояния источник—сейсмостанция и времени регистрации фазы сейсмической волны. Регрессия приближенно отображает статистическую зависимость одной величины от другой. Точность такого приближения определяется, в основном, точностью изменения времени в точке наблюдения, отклонением эпицентров от линии проекции годографа на земную поверхность, многопараметричностью наблюдаемых событий.

Можно также рассматривать задачу построения годографа как аппроксимацию функции многих аргументов суперпозицией функций с меньшим их числом, правомерность которой была доказана [Колмогоров, 1956]. С этих позиций построение функции годографа можно рассматривать как суперпозицию наблюдаемых примеров ее поведения. В классическом приложении эти наблюдения представляются функцией с одним аргументом – эпицентральной расстоянием, определяющим ее информативность. Очевидно, увеличив число аргументов в примерах поведения функции-годографа мы увеличим их информативное наполнение, а нелинейную суперпозицию позволят осуществить сети искусственных нейронных.

В этом ключе такая задача решалась для сейсмостанций «Одесса», «Сквира», «Полтава», организованных в сеть в рамках программы создания национальной сети сейсмических наблюдений.

Каждое зарегистрированное на этих сейсмостанциях событие кодировалось пятимерным вектором:

$$x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = \overline{1, 5}, \quad (1)$$

с компонентами: глубина фокуса землетрясения, магнитуда, обратный азимут, эпицентрального расстояние, время пробега фаз *P*- и *S*-волн.

Множество таких векторов для каждой сейсмической станции использовалось в качестве обучающего для прямопоточной, многослойной, полносвязанной, управляемой сети искусственных нейронов [Chen С., Chen Н., 1995]. В результате обучения методом обратной передачи ошибки [Chauvin, Rumelhart, 1995] были построены модели времен распространения фаз сейсмических волн на каждой из сейсмостанций, позволяющие проигрывать как различные сценарии поведения времен прихода волн в зависимости от величин компонентов вектора (1), так и повышать точность определения координат регистрируемого на сейсмической станции события [Лазаренко, Герасименко, 2004; 2008].

В соответствии с задачей были смоделированы локальные годографы для неких осредненных трасс прихода сейсмических волн к каждой из трех сейсмических станций: для с/с «Одесса» ориентация обратных азимутов  $110^\circ$ ,  $158^\circ$ ,  $204^\circ$ ,  $249^\circ$ ; для с/с «Сквира» —  $121^\circ$ ,  $158^\circ$ ,  $191^\circ$ ,  $209^\circ$ ; для с/с «Полтава» —  $135^\circ$ ,  $175^\circ$ ,  $208^\circ$ ,  $273^\circ$  (рис. 1).

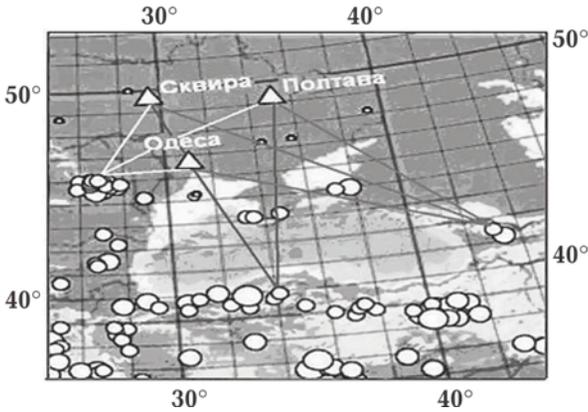


Рис. 1. Схема региона с направлениями контрольных азимутов прихода сейсмических волн на станции наблюдения.

В качестве модели использовалась трехслойная сеть искусственных нейронов с архитектурой NN=4:25:1, где в роли учителя выступает время прихода на сейсмостанцию одной из фаз сейсмических волн.

Анализ приведенных на рис. 2 зависимостей показывает, что характер распределения невязок для каждой сейсмической станции индивидуален и зависит от геологических осо-

бенностей среды. При изменении направления распространения сейсмических волн изменяются значения невязок по модулю, однако основные тенденции остаются постоянными. Для повышения точности построений, особенно на территории Украины, целесообразно использовать локальные годографы, построенные для отдельных сейсмостанций, которые максимально отражают особенности строения региона.

При изучении геологической среды с помощью сейсмических волн принято анализировать отклонения времени регистрации *P*- и *S*-волн локального годографа от стандартной сферически-симметричной модели, каким в нашей работе есть годограф Джеффриса — Буллена [Jeffreys, Bullen, 1940]. Возможность оперировать эмпирическими и «эталонными» нейросетевыми моделями времени прихода сейсмических волн, позволяет получать «невязки» времен пробега сейсмических волн для произвольной трассы региона [Лазаренко, Герасименко, 2010, соотношение (12)].

Приведенные на рис. 3 невязки демонстрируют региональное распределение трехмерных невязок *P*- и *S*-волн для разных глубин гипоцентра, сгенерированных нейросетевыми моделями трех сейсмических станций. При типичной для рассматриваемого региона длине годографов порядка 2000 км, можно оценивать глубину распространения сейсмических волн как  $\sim 1/10$  эпицентрального расстояния, что дает возможность исследовать аномалии скорости сейсмических волн больших блоков,

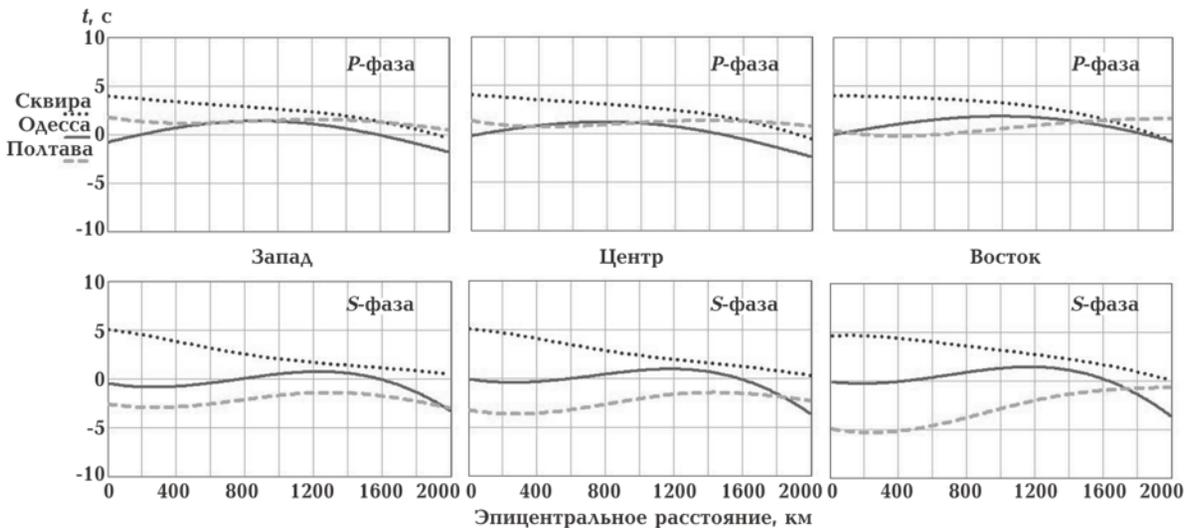


Рис. 2. Зависимость невязок моделированных годографов *P*- и *S*-волн при глубине очага 0 км и  $M=5$  для разных сейсмических станций в зависимости от направления прихода сейсмической волны с запада (а), центра (б), востока (в): 1 — с/с «Сквира», 2 — с/с «Одесса», 3 — с/с «Полтава».

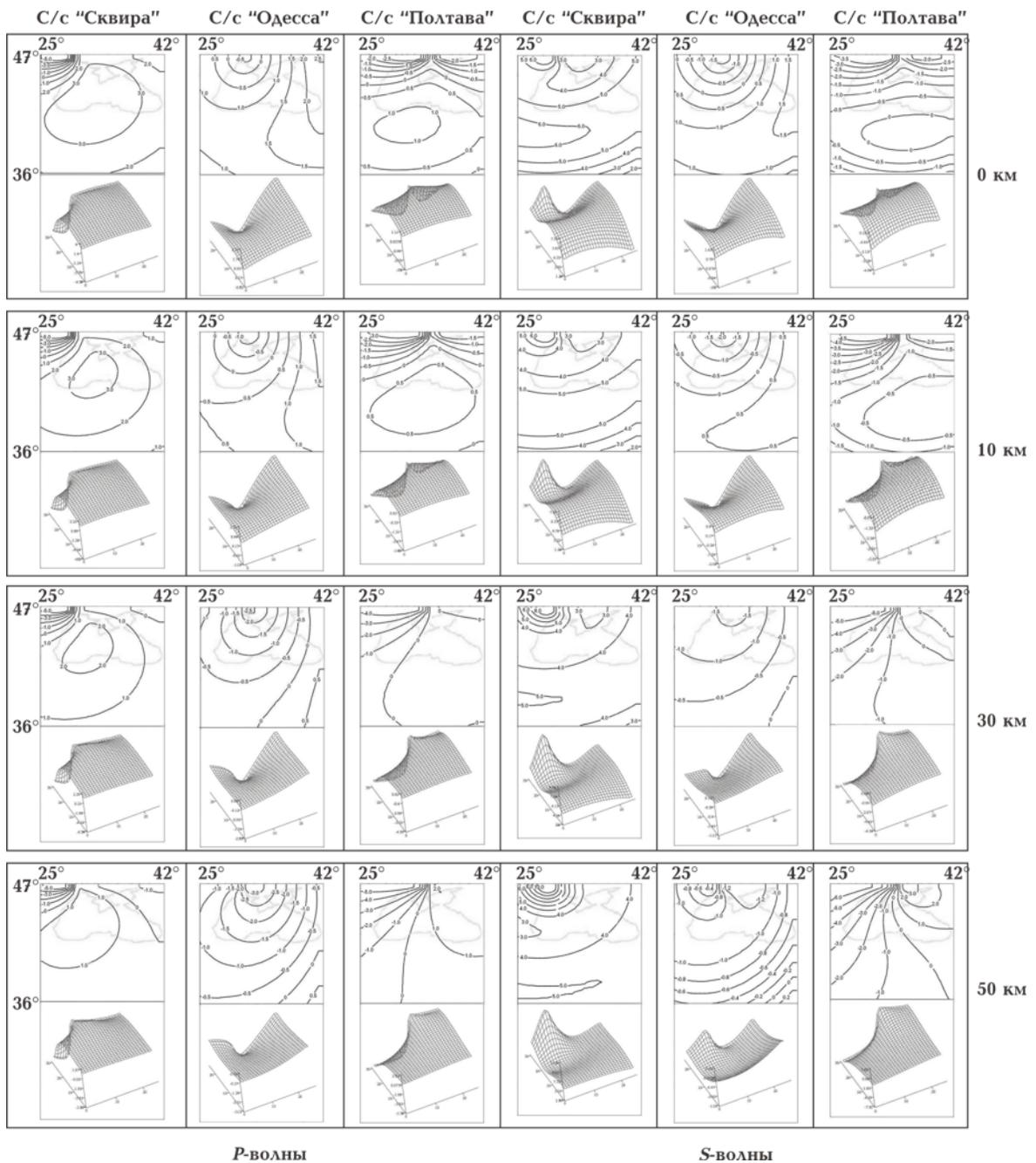


Рис. 3. Невязки времен пробега  $P$ - и  $S$ -волн, зарегистрированных сетью сейсмических станций, в зависимости от глубины гипоцентра (0—50 км)

в первую очередь трех регионов — восточного направления (землетрясения Кавказа, восточной Турции), южного направления (землетрясения Турции, Крыма, акватории Черного моря) и западного (землетрясения Греции, Карпат, Италии).

**Выводы.** Полученные с помощью нейронного моделирования зависимости времен пробега сейсмических волн от расстояния наилучшим образом с заданной погрешностью аппроксими-

мируют облако данных, полученных для ограниченных азимутальных диапазонов сейсмических наблюдений. Такой подход моделирования годографов может быть использован для локализации пространственных аномалий при изучении геологических особенностей строения и оценок его влияния на время прихода волн таких составляющих входного вектора как глубина очага, азимут и магнитуда.

Алгоритм моделирования годографов мо-

жет быть легко вмонтирован в пакет обработки сейсмологических данных и постоянно со-

вершенствоваться при накоплении данных о новых землетрясениях.

### Список литературы

- Колмогоров А. Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных // Докл. АН СССР. — 1956. — **108**, № 2. — С. 179—182.
- Лазаренко М. А., Герасименко О. А. Використання нейронних мереж для побудови годографів сейсмічних хвиль // Вісн. Київ. нац. ун-ту. Геологія. — 2004. — Вип. 30. — С. 93—98.
- Лазаренко М. А., Герасименко О. А. Моделювання сейсмічної анізотропії акваторії Чорного моря за допомогою мереж штучних нейронів // Вісн. Київ. нац. ун-ту. Геологія. — 2008. — Вип. 45. — С. 18—23.
- Лазаренко М. А., Герасименко О. А. Нейросетевое моделирование годографов сейсмических волн // Геофиз. журн. — 2010. — **32**, № 5. — С. 126—141.
- Chauvin Y., Rumelhart D. Back Propagation: Theory, Architectures, and Applications. — New-York: Lawrence Erlbaum Associates, 1995. — 561 p.
- Chen C., Chen H. Universal Approximation to Nonlinear Operators Neural Networks with Arbitrary Activation Function and its Application to Dinamical Systems // Neural Networks. — 1995. — № 6. — P. 911—917.
- Jeffreys H., Bullen K. Seismological Tables. — London: British Association Seismological Committee, 1940. — 145 p.