

УДК 550.34

АНАЛИЗ ГОДОГРАФОВ ДЛЯ ЮГА АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ ПО ЗАПИСЯМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

© 2022 г. Т.А. Тушко¹, В.И. Герман^{2,3}

¹ *Институт космических и информационных технологий СФУ, г. Красноярск, Россия*

² *Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья,
г. Красноярск, Россия*

³ *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Автор для переписки: Т.А. Тушко (e-mail: TTushko@sfiu-kras.ru)

В настоящее время на территории Тывы, Хакасии и юга Красноярского края развёрнута локальная сейсмическая сеть, которая позволяет регистрировать слабые сейсмические события, ранее недоступные для исследования. За время наблюдений ею зарегистрировано множество искусственных сейсмических источников с известными координатами – промышленных взрывов. Используя наиболее качественные записи, была поставлена задача сравнения и анализа годографов, задающих скоростное строение среды в регионе. В представленной статье рассматриваются годограф, используемый в настоящее время для локации сейсмических событий, и предлагаемый авторами новый региональный годограф. Этот годограф был рассчитан на основе ранее построенной блоково-слоистой скоростной модели среды с помощью алгоритма, базирующегося на аналитических решениях прямой кинематической задачи сейсмологии в среде с линейной зависимостью скорости от глубины. Расчёты выполнены с шагом 5 км по глубине и эпицентральному расстоянию; предусмотрено введение стационарных поправок к годографу за зоны малых скоростей под сейсмостанциями и их превышение над уровнем моря. Предварительное сравнение годографов между собой указывает на более глубокое положение границы Мохо в принятой модели среды и рост скорости с глубиной в пределах земной коры при меньшем начальном значении. Для анализа годографов было отобрано 37 взрывов с наибольшими магнитудами, зарегистрированных семью сейсмостанциями. Всего получилось 119 сейсмических лучей. Для всех лучей рассчитаны временные невязки между экспериментальными моментами вступления волн на сейсмостанцию и прогнозными – снятыми с рассматриваемых годографов. Результаты сравнений сведены в две таблицы. В первой таблице отражены невязки, полученные по данным одного произвольно выбранного источника. Во вторую включён весь экспериментальный материал, причём статистически обработанный для устранения влияния случайных ошибок. Сравнение показывает, что уровень временных невязок между экспериментальными временами и снятыми с нового годографа меньше невязок для действующего годографа практически по всем сейсмостанциям. Кроме того, отсутствует рост уровня невязки с ростом эпицентрального расстояния, характерный для действующего годографа. Это подтверждает предположение авторов, что модель, которая лежит в основе нового годографа, лучше отображает скоростное строение среды территории, контролируемой сейсмической сетью. Таким образом, на основе сравнительного анализа невязок, характеризующих степень соответствия годографов реальной среде, можно сделать вывод о перспективности нового регионального годографа для задач обработки данных от местных и близких сейсмических событий и землетрясений в сейсмоактивном регионе, включающем юг Красноярского края, Хакасию и Тыву.

Ключевые слова: скоростная модель среды, годограф, сейсмостанция, сейсмический луч, временная невязка, рефрагированная волна, головная волна, гипоцентр.

Введение

Одна из основных задач сейсмологического мониторинга – определение положения сейсмического события и времени его возникновения. Эти параметры должны наилучшим образом соответствовать моментам вступлений упругих волн, которые

выделяются на записях, зарегистрированных сейсмостанциями. Проверка и поиск такого соответствия в подавляющем большинстве случаев ведётся с помощью годографов. Если годограф как модель глубинного скоростного строения среды содержит ошибки, это неизбежно приведёт к ошибкам в определении искомым параметров события, особенно при неблагоприятных условиях приёма. В связи с этим идёт постоянная работа по уточнению как скоростного строения земной коры, так и соответствующих ей годографов на глобальном и региональном уровнях [Кульчицкий, 2018; Бурмин, Кугаенко, 2019; Kennett, Engdahl, Buland, 1995; Lynner, Porritt, 2017; Manu-Marfo et al., 2019; Magrin, Rossi, 2020; и многие др.].

Записи волн от искусственных источников с известными координатами дают возможность проверить годограф на соответствие отображаемой среде. В настоящей работе рассматриваются два годографа – новый региональный годограф и годограф, который принят к использованию Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья (ГПКК “КНИИГиМС”), проводящим сейсмологический мониторинг на территории Тывы, Хакасии и южной части Красноярского края. Перечисленные территории относятся по геологическому строению к Алтае-Саянской складчатой области, на основе анализа сейсмической изученности которой была предложена блоково-слоистая скоростная модель среды [Тушко, Осеев, Пилимонкин, 2010] и с помощью разработанных алгоритмов [Тушко, 2011] был рассчитан региональный годограф [Тушко, 2014]. Цель его построения – повышение точности интерпретации данных от местных и близких землетрясений благодаря учёту особенностей глубинного строения среды в регионе. Постановке и решению этой задачи немало способствовали рост сейсмической активности в регионе и развитие сети сейсмических наблюдений [Баранов, Герман, Осеев, 2013]. Однако полученный региональный годограф ещё не принят к использованию на практике, поэтому актуальным является его изучение и опробование на экспериментальном материале. В настоящей публикации выполнен сравнительный анализ годографов с моментами вступления продольных волн от взрывов, произведённых на Каахемском угольном разрезе (Республика Тыва) и зарегистрированных сейсмостанциями ГПКК “КНИИГиМС”.

Скоростная модель среды

Как упоминалось выше, для построения модели среды в регионе были использованы данные по скоростному строению земной коры Алтае-Саянской складчатой области на участке, включающем Тыву, Хакасию и юг Красноярского края, которые характеризуются наибольшей сейсмической активностью. Данные, полученные методами МОВЗ и ГСЗ, были взяты из отчётов ГПКК “КНИИГиМС” [Линд, 2004; Кадурин, Белявский, Егоркин, 2008] и ряда других работ [Тойб и др., 2003; Павленкова, Павленкова, 2008]. Подробное описание исходного экспериментального материала приводится в публикации, посвящённой построению скоростной модели среды [Тушко, Осеев, Пилимонкин, 2010], где дано обоснование выбора типа модели, изложена методика количественной оценки задающих её параметров. За основу была взята блоково-слоистая скоростная модель среды, представляющая собой совокупность одномерных трёхслойных моделей. Такого типа модели применяются в сейсмологии (см., например, [Ващилов, 1973; Пивоварова, Славина, 1985; Кондорская, Тушко, 1993]) и соответствуют общим представлениям о глубинном строении земной коры в регионе [Соловьев и др., 2007; Лобацкая, Краснораменская, 2008]. В результате, исследуемая территория была представлена восемью скоростными блоками. Каждый блок задавался одномерной трёхслойной скоростной моделью. Верхний слой включал низкоскоростную осадочную

часть разреза, скорость в нем V_1 считалась постоянной. Второй включал в себя консолидированную часть земной коры, он характеризовался линейным законом возрастания скорости с глубиной $V(z)=V_0 + \alpha z$, где $V_0, \alpha = \text{const}$. Скорость в верхах мантии V_2 задавалась константой. Границы в блоке предполагались горизонтальными, с глубинами залегания h_1 и h_2 соответственно. Таким образом, среда в блоке была описана шестью параметрами $\{V_0, \alpha, V_1, V_2, h_1, h_2\}$.

Для расчёта годографа нами была выбрана территория, охваченная локальной сетью сейсмостанций. Глубинное строение земной коры в ней представлено в основном блоком 5 и частично граничащими с ним блоками 7 и 8. Было принято решение усреднить параметры модели пропорционально площади вошедших блоков и считать рассматриваемую территорию единым блоком. Кроме того, было обнаружено, что верхний осадочный слой присутствует по площади весьма фрагментарно. Это позволило дополнительно упростить скоростную модель блока для определения времён распространения волн в ней, исключив верхний низкоскоростной слой и экстраполировав функцию $V(z)$ до дневной поверхности. Однако там, где низкоскоростной слой прослеживался, его влияние было учтено в виде стационарных поправок, вычисляемых на основе параметров $\{V_0, V_1, h_1\}$. Это было сделано для двух из семи сейсмостанций *KZL* и *CHDN*. Параметры полученной скоростной модели для единого блока имели следующие значения: $V_0=6.1$ км/с, $\alpha=0.021$ с⁻¹, $V_1=5.4$ км/с, $V_2=8.0$ км/с, $h_1=4.0$ км, $h_2=53.0$ км [Тушко, 2014]. На основе этой модели был рассчитан годограф первых вступлений *P*-волн для указанной территории с шагом 5 км по глубине и эпицентральному расстоянию.

Алгоритм расчёта годографа

Годограф – это зависимость времени пробега сейсмической волны от эпицентрального расстояния Δ и глубины источника z , выражаемая графически или таблично $T(\Delta, z)$. В настоящей работе будут обсуждаться годографы первых вступлений продольных волн (*P*-волн) от источников, расположенных близ дневной поверхности ($z=0$).

Как показывает анализ волновой картины, первое вступление в описанной выше модели среды может быть образовано либо рефрагированной в верхнем линейном слое волной, либо головной волной от границы Мохо. Ясно, что на близких эпицентральных расстояниях первой вступает рефрагированная волна, далее её обгоняет головная – за счёт более высокой средней скорости распространения.

Алгоритм расчёта годографов основывается на аналитических решениях, полученных исходя из общей постановки прямой кинематической задачи сейсмологии в лучевом приближении. Подробное, проиллюстрированное обоснование всех расчётных формул приведено в работе [Тушко, 2011].

Рассмотрим расчёт годографа рефрагированной волны. Время движения волны в среде и скоростная функция в ней связаны интегрально [Аки, Ричардс, 1983; Бурмин, 2019]

$$T = 2 \int_0^{\hat{z}} \frac{dz}{V(z)\sqrt{1 - p^2 V^2(z)}}, \quad (1)$$

где \hat{z} – точка наибольшего погружения луча в среду; $V(z) = V_0 + \alpha z$ – скоростная функция; p – лучевой параметр, равный константе вдоль всей траектории данного луча.

Для случая линейной скоростной функции время вычисляется в явном виде. Интегрируя выражение (1) и учитывая при этом, что $V(\hat{z}) = 1/p$, получим искомое уравнение годографа

$$T_{\text{реф.}} = \frac{2}{\alpha} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 - p^2 V_0^2}}{p V_0} \right). \quad (2)$$

Определение лучевого параметра, входящего в уравнение (2), представляет собой отдельную задачу. Лучевой параметр равен $p = \sin e(z)/V(z)$, где $e(z)$ – угол между лучом и вертикалью в точке луча на глубине z ; $V(z)$ – скорость в той же точке. Найдя угол выхода луча из источника при заданном эпицентральной расстоянии Δ , получим

$$p = 1 / \sqrt{\alpha^2 \Delta^2 + 4V_0^2}. \quad (3)$$

Нетрудно показать, что выражение (2) совпадает с известным уравнением годографа рефрагированной волны, приведённым в работе [Саваренский, Кирнос, 1955],

$$T(\Delta) = \frac{2}{\alpha} \operatorname{arsh} \left(\frac{\Delta \alpha}{2V_0} \right).$$

Перейдём к годографу головной волны. Она возникает, когда синус угла падения волны на границу раздела равен отношению скоростей в средах. Лучевой параметр при этом будет равен $p=1/V_2$, где V_2 – скорость в верхах мантии.

Траекторию головной волны можно представить как сумму трёх отрезков: погружение луча из источника сквозь земную кору до границы Мохо, скольжение вдоль границы раздела кора–мантия, восхождение луча от границы до приёмника. Если источник расположен на дневной поверхности ($z=0$) и граница горизонтальная, то времена погружения и восхождения луча одинаковы и равны

$$T_M = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{(1 + \sqrt{1 - p^2 V_0^2})(V_0 + \alpha z_M)}{V_0 (1 + \sqrt{1 - p^2 (V_0 + \alpha z_M)^2})}. \quad (4)$$

Здесь z_M – глубина залегания границы Мохо. Решение (4) также получено путём интегрирования (1) в пределах от 0 до z_M . Значение горизонтальной составляющей пути, который проходит луч с параметром p до выхода на поверхность вычисляется на основе известного уравнения [Аки, Ричардс, 1983], задающего расстояние

$$X = 2 \int_0^{z_M} \frac{pV(z) dz}{\sqrt{1 - p^2 V^2(z)}}. \quad (5)$$

Интегрируя (5) от 0 до z_M , получаем расстояние D по горизонтали, пройденное лучом при его движении сквозь земную кору

$$D = \frac{V_2}{\alpha} \left(\sqrt{1 - p^2 V_0^2} - \sqrt{1 - p^2 (V_0 + \alpha z_M)^2} \right). \quad (6)$$

Время пробега луча головной волны находим по формуле

$$T_{\text{гол.}} = 2T_M + (\Delta - 2D)/V_2, \quad (7)$$

при условии, что $(\Delta - 2D) \geq 0$.

Описанный алгоритм решения прямой кинематической задачи в заданной среде построен на аналитических решениях, обладающих устойчивостью и не дающих большой погрешности в вычислениях по сравнению с численными алгоритмами.

Расчёт стационарных поправок, дополняющих годограф, подробно рассмотрен в работе [Тушко, 2014]. Зная угол подхода луча к поверхности e , и аппроксимируя траекторию луча в низкоскоростном слое отрезком прямой длиной $h_1/\cos e$, значение стационарной поправки Δt определяется по формуле

$$\Delta\tau = \frac{h_1(V_0 - V_1)}{V_0 V_1 \cos e}. \quad (8)$$

Аналогично можно учесть и превышение станции над уровнем моря $h_{ст}$.

Сравнение годографов

Приведём сравнительное описание двух годографов, участвующих в настоящем исследовании. Первый – годограф, разработанный для Прибайкалья [Голенецкий, Кругляков, Первалова, 1978], далее именуемый годограф “Байкал”. Второй – предлагаемый авторами региональный годограф, рассчитанный на основе описанной выше скоростной модели [Тушко, 2014], далее именуемый годограф “Тыва”.

При расчёте годографа “Байкал” рассматривалась однослойная модель земной коры со скоростью $V_P=6.15$ км/с; для мантии скорость V_P составляла 8.0 км/с. Близкие скоростные параметры использовались также в однослойной модели, разработанной для Алтае-Саянской складчатой области [Цибульчик, 1967] – для земной коры $V_P=6.1$ км/с, а для мантии $V_P=8.1$ км/с. Годограф “Байкал” содержится в программе обработки данных WSG [Красилов, Коломиец, Акимов, 2006], применяемой в лаборатории геомониторинга ГПКК “КНИИГиМС” [Герман, Славский, 2016].

Годограф “Байкал” состоит из двух таблиц с временами вступления волн P_g и P_n для фиксированных значений глубины источника z . Согласно принятым в сейсмологии обозначениям, годограф P -волн, наблюдаемых в первых вступлениях от близких и местных землетрясений, обозначается как P_g . Годограф P_n – это годограф головных волн от границы Мохо. Годограф “Тыва” состоит из аналогичных таблиц, обозначенных $T_{реф.}$ и $T_{гол.}$, соответственно природе образующих их волн в принятой модели среды, а также для удобства изложения. Все четыре ветки годографов изображены на рис. 1. Напомним, что глубина источника в данном исследовании $z=0$.

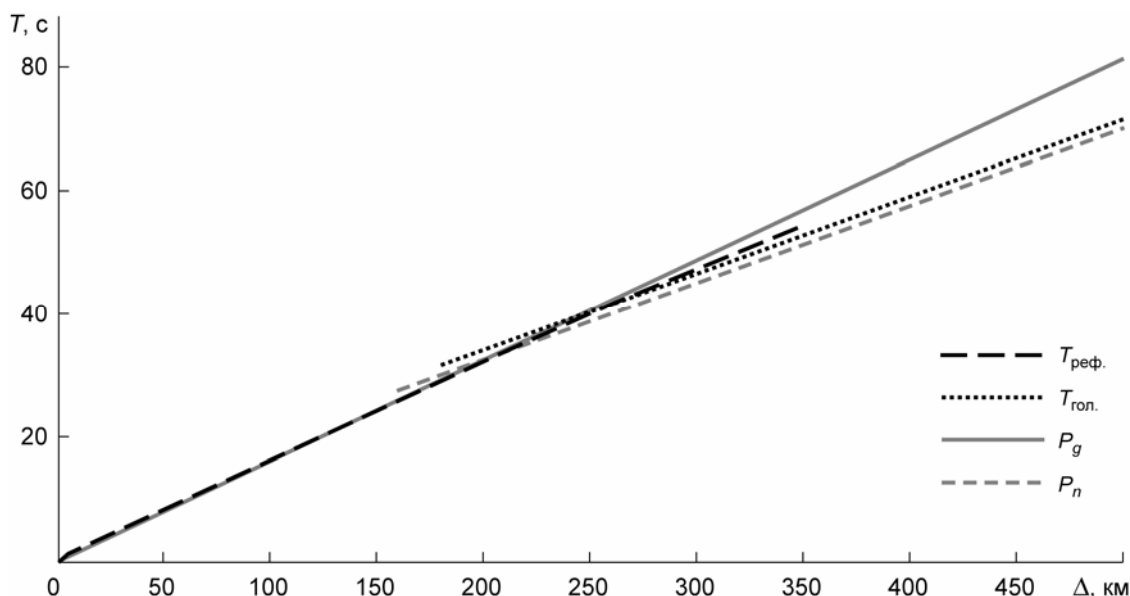


Рис. 1. Времена вступления P -волн от источника на глубине $z=0$ км как функция эпицентрального расстояния

Fig. 1. The arrival times of P -waves from a source at a depth $z=0$ km as a function of the epicentral distance

Начнём сравнение с $T_{\text{реф.}}$ (годограф “Тыва”) и P_g (годограф “Байкал”). На эпицентральных расстояниях от 0 до 130 км эти годографы отличаются незначительно – не более 0.07 с в отдельных точках. При этом от 0 до 75 км график $T_{\text{реф.}}$ идёт чуть выше P_g , а затем наоборот. Разница в наклоне годографов указывает на более быстрый рост скорости с глубиной в модели “Тыва”. В результате этого расхождение между годографами увеличивается с расстоянием и на удалении 250 км оно достигает 0.8 с.

Перейдём к годографам волн, распространяющихся вдоль границы Мохо – это $T_{\text{гол.}}$ и P_n . Волна $T_{\text{гол.}}$ (годограф “Тыва”) вступает первой на расстоянии около 260 км. В годографе “Байкал” волна P_n обгоняет P_g раньше – на расстоянии 200 км. Годограф $T_{\text{гол.}}$ расположен выше годографа P_n на плоскости (T, Δ) на 1.65 с (см. рис. 1). Это результат, прежде всего, более глубокого залегания границы Мохо (примерно на 5–7 км) в южной части Алтае-Саянской складчатой области по сравнению с моделью Прибайкалья [Цибульчик, 1967; Винник и др., 2017].

Итак, обсуждение годографов для $z=0$ показало, что они отличаются наклоном годографов первых вступлений P -волн на близких удалениях, расстоянием выхода в первое вступление головных волн и высотой расположения годографов головных волн по оси времени. Последнее может быть источником систематической погрешности, внесимой годографом в невязки на удалённых станциях.

Заметим, что в случае заглублённого источника наблюдается несколько иная картина. Так, например, при $z=10$ км область совпадения годографов рефрагированных волн до 0.1 с наблюдается на удалениях от 30 до 130 км. Далее годограф P_g идёт выше $T_{\text{реф.}}$ и невязка между ними растёт, достигая значений 0.8 с на расстоянии 200 км и 3.1 с на отметке 350 км. На удалениях до 30 км невязка в отдельных точках достигает значений 0.6 с. Годограф головной волны $T_{\text{гол.}}$ идёт выше годографа P_n в среднем на 1.59 с на всём протяжении [Тушко, 2017].

Экспериментальные данные и методика работы с ними

Для дальнейшего анализа годографов были использованы сейсмические записи взрывов, произведённых на Каахемском угольном разрезе, расположенном в 10 км к юго-востоку от г. Кызыл. Сейсмические волны от промышленных взрывов были зарегистрированы сейсмостанциями ГПКК “КНИИГиМС”. Взаимное расположение источника и приёмников изображено на рис. 2.

Для анализа было отобрано 37 взрывов с наибольшими магнитудами за период с мая 2012 г. по июнь 2015 г. Однако бóльшая часть из них оказалась зарегистрирована всего четырьмя различными сейсмостанциями из десяти имеющихся. В итоге, к рассмотрению было принято 119 сейсмических лучей.

Исходными данными по каждому событию (взрыву) являлись координаты источника и приёмников (сейсмостанций, зарегистрировавших событие), времена вступления продольных P - и поперечных S -волн на сейсмических записях, время в источнике или момент взрыва t_0 . Времена вступлений получены в результате первичной ручной обработки записей (волновых форм) оператором. Для лучшего выделения вступлений среди фоновых шумов использовалась, как правило, фильтрация исходного сигнала в диапазоне частот 0.6–2.0 Гц. Время в источнике t_0 рассчитывалось с помощью программы обработки данных *WSG* [Красилов, Коломиец, Акимов, 2006], установленной в лаборатории геомониторинга ГПКК “КНИИГиМС”. Выборочная проверка результатов вручную по методу Вадати показала хорошее совпадение. К исходным данным также были отнесены описанные выше годографы, названные как годограф “Байкал” и региональный годограф “Тыва”.

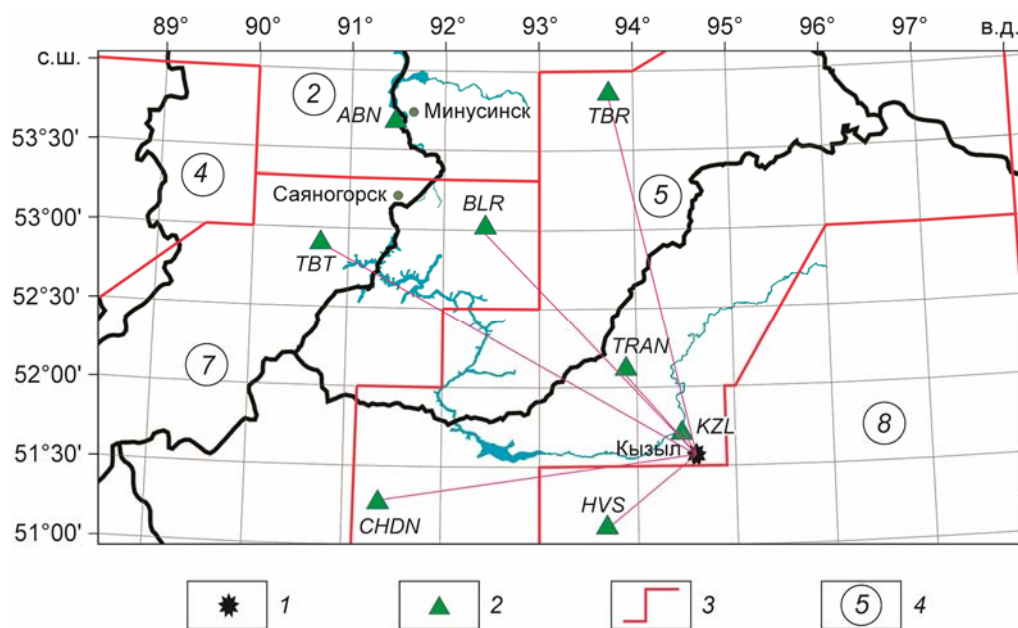


Рис. 2. Схема расположения сейсмостанций. 1 – источник; 2 – сейсмостанции с указанием их кодов; 3 – границы скоростных блоков; 4 – номер блока

Fig. 2. Scheme of the location of seismic stations. 1 – source; 2 – seismic stations with indication of their codes; 3 – boundaries of velocity blocks; 4 – block number

Методика работы с сейсмическими записями от искусственных источников на Каахемском разрезе осуществлялась исходя из принципов обработки данных от местных ($\Delta \leq 200$ км) и близких ($200 < \Delta \leq 1000$ км) землетрясений, изложенных в [Инструкция ..., 1981]. Местные и близкие землетрясения характеризует высокочастотный состав и малая длительность записи. Волны от них распространяются в земной коре, но не всегда ясно, волна какого типа первой вступает на записи. Сейсмологическая практика показывает, что, если интервал между вступлениями P - и S -волн превышает 25 с, то наиболее вероятно это вступили волны P_n и S_n . Учитывая изложенное, для сравнения экспериментального времени прихода волны с расчётным с годографа снималось требуемое из $\{P_g, P_n\}$ значение при фиксированном эпицентральной расстоянии Δ .

Анализ невязок и обсуждение результатов

Результаты сравнений годографов на основе временных невязок оформлены в виде двух таблиц. В табл. 1 представлены данные по выбранному случайным образом источнику с временем в очаге 21.02.2015 г., 05:35:39.141 из серии промышленных взрывов на Каахемском угольном разрезе. Событие зарегистрировано четырьмя сейсмостанциями (HVS , BLR , $CHDN$ и TBT), расположенными на расстояниях от 84.35 до 306.96 км от источника.

Первые три столбца табл. 1 содержат общие сведения о станции – её код, координаты, эпицентральной расстояние Δ до источника. В столбец 4 занесены станционные поправки к годографу, которые обусловлены превышением сейсмостанции над уровнем моря $\Delta\tau(h)$ и наличием зоны малых скоростей под ней $\Delta\tau(ЗМС)$, рассчитанные по формуле (8). В столбце 5 находятся измеренные времена пробега волн от источника до сейсмостанции: $T_{\text{эсп.}} = T_P - t_0$, где T_P – время вступления P -волны, снятое с сейсмограммы, t_0 – момент взрыва. В столбце 6 – временной интервал между вступлениями

Таблица 1. Анализ сейсмических лучей от взрыва на Каахемском угольном разрезе (координаты источника 51.63° с.ш., 94.63° в.д.; $z=0$ км; время в очаге 21.02.2015 г. 05:35:39.141)

Код станции	Координаты		Δ , км	$\Delta\tau(h)$, с $\Delta\tau(3МС)$, с	$T_{\text{эсп.}}^c$ (P -волна)	$T_S - T_P$, с	Годограф “Байкал”		Годограф “Тыва”	
	φ° с.ш.	λ° в.д.					$T_{\text{теор.}}$, с	Δt , с	$T_{\text{теор.}}$, с	Δt , с
1	2		3	4	5	6	7		8	
<i>HVS</i>	51.14	93.70	84.35	+0.176 –	14.293	10.18	13.796 (P_g)	0.497	13.788	0.329
<i>BLR</i>	53.04	92.43	218.68	+0.091 –	35.038	25.74	34.8 (P_n)	0.238	35.052	–0.105
<i>CHDN</i>	51.29	91.35	230.24	+0.2 +0.2	37.727	27.76	36.6 (P_n)	1.127	36.820	0.507
<i>TBT</i>	52.93	90.72	306.96	+0.086 –	49.252	35.92	45.8 (P_n)	3.452	47.192	1.974

P - и S -волн на записи, позволяющий идентифицировать тип вступившей волны (P_g или P_n) для расчёта невязки. В столбцах 7 и 8 содержатся основные результаты сравнения годографов “Байкал” и “Тыва” на основе невязок. Каждый столбец включает по две колонки. Так, в левой колонке столбца 7 отображены теоретические времена движения волны $T_{\text{теор.}}$, снятые с годографа “Байкал” с указанным в скобках типом волны – P_g или P_n . В правой колонке – значения невязок, вычисленные по формуле

$$\Delta t = T_{\text{эсп.}} - T_{\text{теор.}} \quad (9)$$

В столбце 8 – время $T_{\text{теор.}}$, снятое с годографа первых вступлений P -волн “Тыва” и соответствующая ему невязка по каждой станции. При её вычислении к $T_{\text{теор.}}$ были прибавлены станционные поправки из столбца 4.

Сравнение показывает, что по всем сейсмостанциям наименьшие невязки даёт региональный годограф “Тыва”. Для двух ближайших сейсмостанций годограф “Байкал” также демонстрирует небольшие невязки. Для более удалённых сейсмостанций (*CHDN* и *TBT*) невязки по годографу “Байкал” резко возрастают. Частично это можно было бы отнести к систематической погрешности, вносимой годографом P_n “Байкал” в местный материал. Однако значение невязки на сейсмостанции *TBT* велико и с годографом “Тыва”. Это наталкивает на мысль о том, что вместо теоретически идущего вначале вступления волны P_n оператором указан момент вступления волны P_g . Такой вариант представляется вполне возможным в связи с тем, что искомые вступления на записях могут иметь амплитуду сходную с уровнем фоновых шумов или даже ниже. Кроме того, известно, что вступления волны P_n могут иметь меньшую амплитуду, нежели вступления волны P_g [Bormann, Klinge, Wendt, 2014]. В таких условиях идентификацию типа волны, снятой с записи, нельзя считать надёжной.

Результат анализа всех 119 лучей от 37 взрывов, зарегистрированных семью сейсмостанциями, приведён в табл. 2. Поскольку координаты источников отличались незначительно, наблюдаемые данные от них (времена прихода волн) были статистически обработаны. Это позволило минимизировать влияние случайных ошибок при регистрации и снятии данных с сейсмограмм. Так были найдены среднее значение (математическое ожидание) времени пробега волны и среднее квадратическое отклонение от среднего (дисперсия) для каждой из семи сейсмостанций. Отклонения принимали значения от 0.38 до 0.49 с для разных станций; в случае наиболее удалённой станции *TBT* отклонение достигает 0.61 с. Именно среднее значение было взято в качестве экспериментального времени распространения волны от источника до сейсмостанции $T_{\text{эсп.}} = \bar{t}_{\text{эсп.}}$ при определении анализируемых невязок (9).

Таблица 2. Анализ сейсмических лучей от серии взрывов на Каахемском угольном разрезе, (координаты источника 51.63° с.ш., 94.63° в.д.; $z=0$ км)

Код станции	Координаты		Δ , км	Число лучей	$\Delta\tau(h)$, с $\Delta\tau(\text{ЗМС})$, с	$T_{\text{эксп.}}$, с (P -волна)	$T_S - T_P$, с	Годограф “Байкал”		Годограф “Тыва”	
	φ° с.ш.	λ° в.д.						$T_{\text{теор.}}$, с	Δt , с	$T_{\text{теор.}}$, с	Δt , с
1	2		3	4	5	6	7	8		9	
<i>KZL</i>	51.71	94.45	15.23	23	+0.11 +0.45	2.828	1.14	2.436 (P_g)	0.392	2.82	0.008
<i>TRAN</i>	52.12	93.91	73.6	9	+0.166 –	12.548	9.08	12.012 (P_g)	0.536	12.196	0.352
<i>HVS</i>	51.14	93.70	84.35	35	+0.176 –	14.219	10.18	13.796 (P_g)	0.423	13.954	0.265
<i>BLR</i>	53.04	92.43	218.68	20	+0.091 –	35.881	25.74	34.8 (P_n)	1.081	35.143	0.738
<i>CHDN</i>	51.29	91.35	230.24	25	+0.2 +0.2	37.975	27.76	36.6 (P_n)	1.375	37.22	0.755
<i>TBR</i>	53.88	93.74	257.84	1	+0.07 –	41.782	30.89	39.5 (P_n)	2.281	41.06	0.722
<i>TBT</i>	52.93	90.72	306.96	4	+0.086 –	49.856	35.92	45.8 (P_n)	4.056	47.278	2.578

Структура табл. 2 аналогична структуре табл. 1. Здесь лишь добавлен столбец 4 с количеством лучей, зарегистрированных каждой из семи сейсмостанций по всей серии взрывов в разрезе. Кроме того, в столбце 6 указано экспериментально установленное время распространения волны до станции $T_{\text{эксп.}}$, осреднённое по всем лучам. В столбцах 8 и 9 также содержатся данные, снятые с годографов “Байкал” и “Тыва” (левая колонка), и рассчитанные на их основе невязки (правая колонка). Для годографа “Тыва” приведённые здесь времена $T_{\text{теор.}}$ уже включают стационарные поправки.

В целом невязки с региональным годографом “Тыва”, меньше, чем с годографом “Байкал” по всем сейсмостанциям. Показательно, что эта невязка по станции *KZL* отличается на два порядка от невязки с годографом “Байкал”, подчёркивая важность учёта низкоскоростных отложений под станцией.

Подобно табл. 1, начиная с эпицентрального расстояния $\Delta > 200$ км (*BLR*) невязки с годографом “Байкал” увеличиваются с ростом эпицентрального расстояния. При анализе невязок с годографом “Тыва” такой закономерности не наблюдается, что говорит в пользу выбранной модели среды.

Обратимся к невязке по сейсмостанции *TBT*, которая, как и в табл. 1, велика в обоих случаях. Возможная причина этого – ассоциация вступления волны с фазой P_n , а не P_g . Если вступление отнести к фазе P_g , то следует сделать перерасчёт невязки. Невязка с годографом “Тыва”, рассчитанная относительно годографа $T_{\text{реф.}}$, составляет 0.61 с (вместо 2.578 с, указанных в табл. 2), что соответствует уровню невязок с годографом “Тыва” на остальных сейсмостанциях. В итоге, результат хорошо вписывается в общую картину невязок между моментами вступления волн и годографом “Тыва”, а также способствует идентификации фазы вступившей волны.

Выполненные исследования говорят о большей адекватности регионального годографа “Тыва” реальному скоростному строению земной коры в исследуемом районе Алтае-Саянской складчатой области на удаленностях до 300 км, что соответствует глубинам погружения луча не менее 45 км. Он даёт меньшие невязки с экспериментальными данными, чем годограф “Байкал”. Однако для полного анализа годографа “Тыва” необходимы данные от более удалённых ($\Delta \geq 300$ км) искусственных источников и земле-

трясений с надёжно выделенными вступлениями фазы P_n на записях. Предполагается, что на этих расстояниях преимущество регионального годографа должно быть более очевидным.

Выводы

В представленной статье обсуждаются результаты текущего этапа работы по анализу регионального годографа “Тыва” и перспектив его применения для задач обработки данных мониторинга сейсмических событий на территории Тывы, Хакасии и юга Красноярского края.

Скоростная модель среды, лежащая в основе предлагаемого регионального годографа, характеризуется линейным ростом скорости распространения волн с глубиной в пределах земной коры и более глубоким залеганием границы Мохо, чем в модели, заданной годографом “Байкал”. Предусмотрен учёт низкоскоростных отложений под сейсмостанциями путём введения стационарных поправок.

Анализ временных невязок вступления волн от искусственных источников показал, что годограф “Тыва” более адекватен реальному скоростному строению земной коры в исследуемом районе Алтае-Саянской складчатой области для эпицентральных расстояний до 300 км. Уровень временных невязок между экспериментальными моментами вступления волн и снятыми с годографа “Тыва” меньше соответствующих величин по годографу “Байкал”.

Исследование регионального годографа необходимо продолжить с использованием данных от более удалённых источников сейсмических колебаний с надёжно выделенными вступлениями фазы P_n на записях.

Финансирование

Часть сейсмологических записей, использованных при выделении моментов вступлений продольных волн от взрывов на Каахемском угольном разрезе, была получена при исполнении Государственных контрактов Красноярского края по мероприятию “Проведение сейсмического мониторинга Красноярского края”.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х томах. М.: Мир, 1983. 880 с.
- Баранов С.В., Герман В.И., Осеев В.Г. Афтершоковый процесс Тувинского землетрясения 27.12.2011 г. // Геофизические исследования. 2013. Т. 14, № 1. С.16–30.
- Бурмин В.Ю. Некоторые обратные кинематические задачи сейсмологии: теория, эксперименты, результаты. М.: Наука, 2019. 276 с.
- Бурмин В.Ю., Кузнецов Ю.А. Уточнение параметров скоростной модели в районе вулканов Большая и Малая Удина (Ключевская группа вулканов, Камчатка) по данным о локальных землетрясениях // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Седьмой научно-технической конференции. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С.417–421.
- Ващиллов Ю.А. Блоково-слоистая структура земной коры и верхней мантии и представление об астеносфере. Изостазия. М.: Наука, 1973. С.31–43.

- Винник Л.П., Орешин С.И., Цыдыпова Л.Р., Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А., Тубанов Ц.А. Кора и мантия Байкальской рифтовой зоны по данным приемных функций продольных и поперечных волн // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С.695–709.
- Герман В.И., Славский А.В. Центральные и южные районы Красноярского края // Землетрясения России в 2014 году. Обнинск: ГС РАН, 2016. С.89–91.
- Голенецкий С.С., Кругляков М.И., Перевалова Г.И. Годографы сейсмических волн землетрясений Прибайкалья // Сейсмическое и глубинное строение Прибайкалья. 1978. С.30–38.
- Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмологических наблюдений СССР / Отв. сост. Н.В. Кондорская. М.: Наука, 1981. 272 с.
- Кадури И.Н., Белявский В.В., Егоркин А.В. Геофизические исследования сейсморазведочными и электроразведочными методами глубинного строения Алтае-Саянской складчатой области по профилям общей протяженностью 3300 км // Организация и проведение режимных геофизических наблюдений на Тывинском полигоне: Отчет, Геолфонд. 2008. № 492309.
- Кондорская Н.В., Тушко Т.А. Блоково-слоистая модель земной коры и определение гипоцентров землетрясений Каспийского моря // Известия АН СССР. Физика Земли. 1993. № 5. С.17–23.
- Красилов С.А., Коломиец М.В., Акимов А.П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций “Пулково” и “Екатеринбург”. Обнинск: ГС РАН, 2006. С.77–83.
- Кульчицкий В.Е. Новые годографы сейсмических волн Крымско-Черноморского региона // Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4 (70), № 4. С.164–173.
- Линд Э.Н. (отв. исп.) Отчет “Региональные сейсморазведочные и электроразведочные работы для изучения глубинного строения земной коры Алтае-Саянской геосинклинальной области по маршруту МТЗ “Тээли – Ак-Дуруг – Саяно-Шушенская ГЭС”, МОВЗ “Танзыбей – Кызыл – Эрзин”. Красноярск: КНИИГиМС, 2004. Книга 1. 109 с.
- Лобацкая Р.М., Краснораменская Т.Г. Объемная неотектоническая разломно-блоковая модель Алтае-Саянской складчатой области как основа для анализа и прогноза сейсмичности // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2008. № 6 (32). С.132–142.
- Павленкова Г.А., Павленкова Н.И. Результаты совместной обработки данных ядерных и химических взрывов по сверхдлинному профилю “Кварц” (Мурманск-Кызыл) // Физика Земли. 2008. № 4. С.62–73.
- Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б. Алгоритм и результаты машинного определения координат землетрясений по данным региональной сети (на примере Кавказа) // Применение ЭВМ в сейсмологической практике (Методические работы ЕССН). М.: Наука, 1985. С.53–75.
- Саваренский Е.Ф., Киринос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гос. изд-во тех.-теор. литературы, 1955. 544 с.
- Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Лисейкин А.В., Сальников А.С. Глубинное строение литосферы Алтае-Саянского региона по данным промышленных взрывов, землетрясений и мощных вибрационных источников // Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сеймопрофилирования. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. С.201–206.
- Тойб Р.Е., Мищук О.В., Михайленко В.Г., Кириленко В.А., Золотов Е.Е., Ракитов В.А. Региональные геофизические исследования глубинного строения земной коры Алтае-Саянской геосинклинальной области // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. Вып. 5. С.322–329.
- Тушко Т.А., Осеев В.Г., Пилимонкин Н.С. Построение скоростной модели среды для решения задач гипоцентрии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы V Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2010. С.209–214.
- Тушко Т.А. Алгоритм расчета годографа для среды, содержащей слой с линейной зависимостью скорости от глубины // Вестник СибГАУ. 2011. № 4 (37). С.97–101.

- Тушко Т.А. Расчет годографа Тывы на основе скоростной модели среды // Вестник СибГАУ. 2014. № 3 (55). С.151–156.
- Тушко Т.А. К расчету регионального годографа для обработки данных сейсмомониторинга // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы XII Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2017. С.368–372.
- Цибульчик Г.М. О годографах сейсмических волн и строении земной коры Алтае-Саянской области // Региональные геофизические исследования в Сибири. Новосибирск: Наука, 1967. С.159–169.
- Bormann P., Klinge K., Wendt S. Data Analysis and Seismogram Interpretation // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2). Potsdam: Deutsches GeoForschungs Zentrum GFZ, 2014. P.1–126.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical Journal International. 1995. V. 122, N 1. P.108–124.
- Lynner C., Porritt R.W. Crustal structure across the eastern North American margin from ambient noise tomography // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44, N 13. P.6651–6657.
- Magrin A., Rossi G. Deriving a New Crustal model of Northern Adria: The Northern Adria crust (NAC) model // Frontiers in Earth Science. 2020. V. 8, N 89. P.1–23. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00089>.
- Manu-Marfo D., Aoudia A., Pachhai S., Kherchouche R. 3D shear wave velocity model of the crust and uppermost mantle beneath the Tyrrhenian basin and margins // Scientific reports. 2019. V. 9, N 1. P.3609.

Сведения об авторах

ТУШКО Тамара Алексеевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Институт космических и информационных технологий СФУ. Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 26. Тел.: +7(950) 435-55-02. E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

ГЕРМАН Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, гл. сейсмолог, Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья. Россия, 660049, Красноярск, пр. Мира, д. 55; научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: +7(962) 074-47-02. E-mail: german3v@yandex.ru

ANALYSIS OF HODOGRAPHS FOR THE SOUTHERN PART OF THE ALTAY-SAYAN FOLDED AREA BASED ON RECORDS OF INDUSTRIAL EXPLOSIONS

T.A. Tushko¹, V.I. German^{2,3}

¹ Siberian Federal University (SFU), Institute of Space and Information Technology, Krasnoyarsk, Russia

² Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, Krasnoyarsk, Russia

³ Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Corresponding author: T.A. Tushko (e-mail: TTushko@sfu-kras.ru)

Abstract. Currently, a local seismic network has been deployed on the territory of Tyva, Khakassia and the south of the Krasnoyarsky krai, which allows to record weak seismic events that were previously inaccessible for research. During observations many artificial seismic sources with known coordinates – industrial explosions – were recorded. Using the highest quality records, the task was set to compare and analyze the hodographs that define the velocity structure of the environment in the region. This article discusses the hodograph that is currently used for the location of seismic events and the new regional hodograph proposed by the authors. This hodograph was calculated on the basis of the previously constructed block-layered velocity model of the medium using an algorithm based on analytical solutions of the direct kinematic seismic problem in the medium with linear dependence of velocity on depth. Calculations were made with a step of 5 km in depth and epicentral distance;

the introduction of station corrections to the hodograph for low velocity zones under seismic stations and their excess above sea level was planned. A preliminary comparison of the hodographs indicates a deeper position of the Moho boundary in the accepted model of the medium and an increase in velocity with depth within the Earth's crust at a lower initial value. For the analysis of hodographs, 37 explosions with the highest magnitudes recorded by seven seismic stations were selected. A total of 119 seismic rays were considered. For all rays, the time residuals between the experimental moments of wave arrival at the seismic station and the predicted ones, taken from the travel time curves under consideration, are calculated. The comparison results are summarized in two tables. The first table shows the residuals obtained from the data of one randomly selected source. The second includes all experimental material, statistically processed to eliminate the effect of random errors. The comparison shows that the level of time residuals between the experimental times and those taken from the new hodograph is less than those for the current hodograph for almost all seismic stations. In addition, there is no increase in the level of residuals with an increase in epicentral distance, which is typical for the current hodograph. This confirms the authors' assumption that the model for the new hodograph better reflects the velocity structure of the medium of the area controlled by the seismic network. Thus, based on a comparative analysis of residuals characterizing the degree of correspondence of hodographs to the real environment, one can conclude that new regional hodograph is promising for data processing tasks from local and nearby seismic events and earthquakes in the seismically active region, including the south of the Krasnoyarsky krai, Khakassia and Tyva.

Keywords: velocity model of the medium, hodograph, seismic station, seismic ray, time residual, refracted wave, head wave, hypocenter.

Funding

Part of the seismological records used to identify the moments of *P*-wave arrivals from explosions at the Kaakhemsky coal mine were obtained during the execution of the State contracts of the Krasnoyarsky Krai "Seismic Monitoring of the Krasnoyarsky Krai".

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Aki K., Richards P., *Quantitative seismology. Theory and Methods. In 2 v.*, San Francisco: W.H. Freeman and company, 1980, 842 p.
- Baranov S.V., German V.I., Oseev V.G., Aftershock process of Tuva earthquake 27.12.2011, *Geofizicheskie issledovaniya* (Geophysical research), 2013, vol. 14, no. 1, pp. 16-30. [In Russian].
- Bormann P., Klinge K., Wendt S., Data Analysis and Seismogram Interpretation, in *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2014, pp. 1-126.
- Burmin V.Yu., *Nekotorye obratnye kinematicheskie zadachi seismologii: teoriya, eksperimenty, rezul'taty* (Some inverse kinematic problems of seismology: theory, experiments, results), Moscow: Nauka, 2019, 276 p. [In Russian].
- Burmin V.Yu., Kugaenko Yu.A., Clarification of the parameters of the high-speed model in the area of volcanoes Bolshaya and Malaya Udina (Klyuchevskaya group of volcanoes, Kamchatka) according to data on local earthquakes, in *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Sed'moi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (Problems of integrated geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the seventh scientific and technical conference), Obninsk: FITs EGS RAN, 2019, pp. 417-421. [In Russian].
- German V.I., Slavskiy A.V., Central and southern regions of the Krasnoyarsk Territory, in *Zemletryaseniya Rossii v 2014 godu* (Earthquakes in Russia in 2014), Obninsk: GS RAN, 2016, pp. 89-91. [In Russian].
- Golenetskiy S.S., Kruglyakov M.I., Perevalova G.I., Hodographs of seismic waves of earthquakes in the Baikal region, *Seismicheskoye i glubinnoye stroeniye Pribaykal'ya* (Seismic and deep structure of the Baikal region), 1978, pp. 30-38. [In Russian].
- Instruktsiya o poryadke proizvodstva i obrabotki nablyudeniy na seismicheskikh stantsiyakh Edinoi sistemy seismologicheskikh nablyudeniy SSSR* (Instructions on the procedure for the production and processing of

- observations at seismic stations of the Unified system of seismological observations of the USSR), Moscow: Nauka, 1981, 272 p. [In Russian].
- Kadurin I.N., Belyavskiy V.V., Yegorkin A.V., Geophysical studies by seismic and electrical exploration methods of the deep structure of the Altai-Sayan fold area along profiles with a total length of 3300 km, in *Organizatsiya i provedenie rezhimnykh geofizicheskikh nablyudenii na Tyvinskom poli-gone: Otchet, Geolfond* (Organization and carrying out of regime geophysical observations at the Tuva test site, Report, Geolfond), 2008, № 492309. [In Russian].
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R., Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times, *Geophysical Journal International*, 1995, vol. 122, no. 1, pp. 108-124.
- Kondorskaya N.V., Tushko T.A., Block-layered model of the earth's crust and Caspian sea earthquake hypocenters location, *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* (Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth), 1993, no. 5, p. 17-23. [In Russian].
- Krasilov S.A., Kolomiyets M.V., Akimov A.P., Organization of digital seismic data processing using the WSG software package, in *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: materialy Mezhdunar. seismologicheskoy shkoly, posvyashchennoy 100-letiyu otkrytiya seismicheskikh stantsiy "Pulkovo" i "Ekaterinburg"* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the Intern. seismological school dedicated to the 100th anniversary of the opening of the seismic stations "Pulkovo" and "Yekaterinburg"), Obninsk: GS RAN, 2006, pp. 77-83. [In Russian].
- Kulchitsky V.E., New travel time curves of seismic waves of the Crimean-Black Sea region, *Uchonyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. (Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology.), 2018, vol. 4 (70), no. 4, pp. 164-173. [In Russian].
- Lind E.N. (ed.), Report "Regional seismic and electrical exploration works to study the deep structure of the Earth's crust of the Altai-Sayan geosynclinal region along the route MTZ "Teeli – Ak-Durug – Sayano-Shushenskaya hydroelectric station", MOVZ "Tanzhybey – Kyzyl – Erzin". Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2004, Book 1. 109 p. [In Russian].
- Lobatskaya R.M., Krasnoramenskaya T.G., Volumetric neotectonic fault-block model of Altai-Sayan folded area as the basis for analysis and prediction of seismicity, *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sekcii nauk o Zemle RAEN* (Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences), 2008, no. 6 (32), pp. 132-142. [In Russian].
- Lynner C., Porritt R.W., Crustal structure across the eastern North American margin from ambient noise tomography, *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 13, pp. 6651-6657.
- Magrin A., Rossi G., Deriving a New Crustal model of Northern Adria: The Northern Adria crust (NAC) model, *Frontiers in Earth Science*, 2020, vol. 8, no. 89, pp. 1-23. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00089>
- Manu-Marfo D., Aoudia A., Pachhai S., Kherchouche R., 3D shear wave velocity model of the crust and uppermost mantle beneath the Tyrrhenian basin and margins, *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no. 1, pp. 3609.
- Pavlenkova G.A., Pavlenkova N.I., Results of joint processing of data from nuclear and chemical explosions along the ultra-long profile "Quartz" (Murmansk-Kyzyl), *Fizika Zemli* (Physics of the Earth), 2008, no. 4, pp. 62-73. [In Russian].
- Pivovarova N.B., Slavina L.B., Algorithm and Results of Machine Determination of Earthquake Coordinates Based on Regional Network Data (on the Example of the Caucasus), in *Primeneniye EVM v seismologicheskoy praktike (Metodicheskie raboty ESSN)* (Computer Application in Seismological Practice (Methodical works of ESSN)), Moscow: Nauka, 1985, pp. 53-75. [In Russian].
- Savarenskiy E.F., Kirnos D.P., *Elementy seismologii i seismometrii* (Elements of seismology and seismometry). Moscow: GITTL Publ., 1955, 544 p. [In Russian].
- Solov'yev V.M., Seleznev V.S., Emanov A.F., Liseikin A.V., Sal'nikov A.S., The deep structure of the lithosphere of the Altai-Sayan region according to the data of industrial explosions, earthquakes and powerful vibration sources, in *Modeli zemnoi kory i verkhnei mantii po rezul'tatam glubinnogo seismoprofilirovaniya* (Models of the Earth's crust and upper mantle based on the results of deep seismic profiling), St. Petersburg: VSEGEI, 2007, pp. 201-206. [In Russian].
- Toyb R.E., Mishchuk O.V., Mikhaylenko V.G., Kirilenko V.A., Zolotov E.E., Rakitov V.A., Regional geophysical studies of the deep structure of the earth's crust in the Altai-Sayan geosynclinal region, in *Problemy ispol'zovaniya i okhrany prirodnnykh resursov Tsentral'noy Sibiri* (Problems of the use and protection of natural resources in Central Siberia), Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2003, no. 5, pp. 322-329. [In Russian].
- Tsibul'chik G.M., On the hodographs of seismic waves and the structure of the earth's crust in the Altai-Sayan region, in *Regional'nyye geofizicheskiye issledovaniya v Sibiri* (Regional geophysical research in Siberia), Novosibirsk: Nauka, 1967, pp. 159-169. [In Russian].

- Tushko T.A., Algorithm of calculation of the hodograph for media containing a layer with a linear dependence of velocity on depth, *Vestnik SibGAU* (Bulletin of SibGAU), 2011, no. 4 (37), pp. 97-101 [In Russian].
- Tushko T.A., Calculation of the hodograph for Tuva region on the basis of velocity model of media, *Vestnik SibGAU* (Bulletin of SibGAU), 2014, no. 3 (55), pp. 151-156. [In Russian].
- Tushko T.A., To the calculation of the regional hodograph for processing seismic monitoring data, in *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh: materialy XII Mezhdunarodnoi seysmologicheskoy shkoly* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the XII International seismological school), Obninsk: GS RAN, 2017, pp. 368-372. [In Russian].
- Tushko T.A., Oseyev V.G., Pilimonkin N.S., Construction of velocity model for hypocenter location problem, in *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh: materialy V Mezhdunarodnoi seysmologicheskoy shkoly* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data: materials of the V International seismological school), Obninsk: GS RAN, 2010, pp. 209-214. [In Russian].
- Vashchilov Yu.A., *Blokovo-sloistaya struktura zemnoi kory i verkhnei mantii i predstavlenie ob astenosfere. Izostaziya* (Block-layered structure of the earth's crust and upper mantle and an idea of the asthenosphere. Isostasy), Moscow: Nauka, 1973, pp. 31-43. [In Russian].
- Vinnik L.P., Oreshin S.I., Tsydyanova L.R., Mordvinova V.V., Kobelev M.M., Khritova M.A., Tubanov Ts.A., Crust and mantle of the Baikal rift zone from P- and S-wave receiver function of longitudinal and transverse waves, *Geodinamika i tektonofizika* (Geodynamics and Tectonophysics), 2017, vol. 8, no. 4, pp. 695-709. [In Russian].

About the authors

TUSHKO Tamara Alekseevna – Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate Professor, Siberian Federal University (SFU), Institute of Space and Information Technology. Ak. Kirensky str., 26, Krasnoyarsk, 660074, Russia. Ph.: +7(950) 435-55-02. E-mail: TTushko@sfu-kras.ru

GERMAN Victor Ivanovich – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, chief seismologist, Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals. Mira av., 55, Krasnoyarsk, 660049, Russia; Researcher, Institute of the Earth's Crust SB RAS. Lermontova str., 128, Irkutsk, 664033, Russia. Ph.: +7(962) 074-47-02. E-mail: german3v@yandex.ru