

УДК 550.34

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ СИГНАЛОВ ОТ ФРАГМЕНТОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Виноградов Ю.А.¹, Носкова Н.Н.²

¹ ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск, uavin@mail.ru

² Институт геологии имени академика Н.П. Юшкина Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», г. Сыктывкар, nataliyageo@mail.ru

Введение

В 2016 г. состоялся первый запуск с нового космодрома «Восточный» в Амурской области. Ракета-носитель (РН) «Союз-2.1а» успешно вывела на орбиту три научных спутника. Летные испытания «Союза-2» начались на космодроме «Плесецк» в Архангельской области в 2004 г. Космодром «Плесецк» (1-й Государственный испытательный космодром Министерства обороны Российской Федерации) – самый северный и один из крупнейших космодромов мира, обеспечивающий часть российских и международных космических программ, связанных с оборонными, а также прикладными, научными и коммерческими пусками непилотируемых космических аппаратов. С момента запуска первого космического аппарата (КА) в марте 1966 г. по настоящее время со стартовых площадок «Плесецка» проведено свыше 1600 пусков РН, выведены на околоземные орбиты около 2100 КА различного назначения [4].

В Федеральной космической программе России на 2016–2030 гг., целью которой является удовлетворение растущих потребностей государственных структур, регионов, а также населения страны в космических средствах и услугах, отмечается важность практического решения экологических проблем, возникающих в результате космической деятельности. Обеспечение безопасности, в том числе, экологической, вдоль трасс запусков КА и в районах падения (РП) отделяющихся частей (ОЧ) РН является важным элементом космической деятельности [7].

С физической точки зрения выведение КА на орбиту сопряжено с движением РН на активном участке траектории и полетом штатно отделяющихся частей ракеты (разгонные блоки, головной обтекатель, 1 и 2 ступени), а также их фрагментов на пассивном (неуправляемом) участке траектории. Для запуска ракеты-носителя «Союз-2» с космодрома «Плесецк» с наклоном 62.8° на территории Республики Коми отведены два штатных района падения ОЧ РН – «Вашка» в Удорском районе и «Железнодорожный» на границе Княжпогостского и Корткеросского районов, куда приземляются боковые блоки ускорителя ракеты и створки головного обтекателя соответственно. Условная схема разделения и районы падений фрагментов РН «Союз-2» приведены на рис 1.

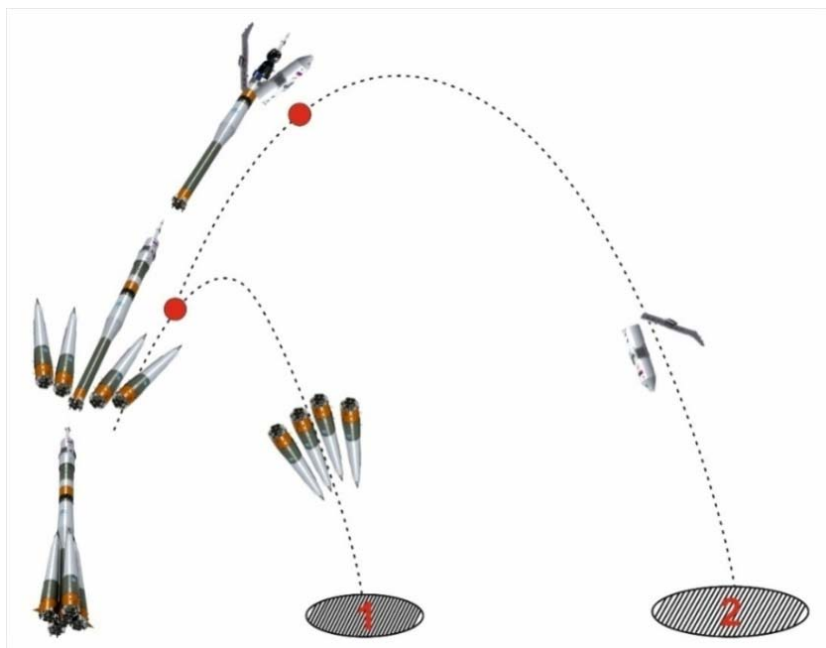


Рис. 1. Условная схема разделения ракеты-носителя «Союз-2» при ее выводе на орбиту и районы падений фрагментов в Республике Коми (1 – «Вашка», 2 – «Железнодорожный»)

Пуски ракет производятся в рамках реализации договора между Правительством Республики Коми и Министерством обороны Российской Федерации («О порядке и условиях эпизодического использования районов падения отделяющихся частей ракет на территории Республики Коми» от 09.02.2004 г.) в целях обороноспособности страны в соответствии с Планом Воздушно-космических сил Российской Федерации [6].

Методика исследований

Наблюдения проводились на сейсмической станции «Сыктывкар» (SYK) Института геологии имени академика Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН. Станция ведет непрерывные сейсмические наблюдения в г. Сыктывкаре с 1996 г. Станция оснащена 3-мя короткопериодными сейсмоприемниками СМ-3КВ, цифровым регистратором UGRA (разработка НПП «Геотех+» совместно с ФИЦ ЕГС РАН). Станцией «Сыктывкар» регистрируются сигналы, вызванные падением створок головного обтекателя ракеты-носителя «Союз-2» в районе падения «Железнодорожный» [5, 8], расположенном северо-восточнее станции на расстоянии 95 км (рис.2).



Рис. 2. Схема местоположения района падения «Железнодорожный», составленная с использованием данных геоинформационного портала Республики Коми [3]

Для расчета времен пробега звукового сигнала от источников, расположенных на различных высотах до сеймостанции, расположенной на земной поверхности, через реальную атмосферу применялись программы моделирования, в которых в качестве исходных параметров задаются параметры атмосферы (температура, плотность, горизонтальный ветер) [12, 13, 14]. Нами использовалась программа RAYVELMOD [2], разработанная в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН.

Обсуждение результатов

За прошедшие 15 лет с северного космодрома проведено 39 пусков РН семейства «Союз-2» этапов модернизации 1а, 1б и 1в [9]. Однако, станцией «Сыктывкар» за 2011–2019 гг. были зарегистрированы только 15 пусков, вызванных падением ОЧ РН среднего класса «Союз-2.1б» и «Союз-2.1а» в ближайший к станции РП «Железнодорожный».

Обычно на сейсмограммах записываются два мощных импульса, с разницей прихода 12–20 с, при этом первый импульс зачастую более сильный (рис. 3, а). В большинстве случаев зафиксировано 2 или 3 пары вступлений, менее четких, растянутых по времени (рис. 3, б). Форма сигналов, показанных на рис. 2, типична. Длительность сигнала составляет, в среднем 6–8 с, преобладающие частоты: 1.5 Гц, 4–6 Гц и 12–16 Гц. Характерной особенностью также является, что сигналы, зарегистрированные в зимние месяцы, как правило, приходят позже в среднем на 10–12 с, чем в весенне-летне-осенние месяцы, если за нулевую точку отсчета принять время старта ракеты.

Большая разница (более 20 с от старта ракеты) во времени прихода сигналов на сейсмическую станцию после теоретического времени падения, наличие многократных приходов сигналов от одних и тех же створок обтекателя на записях и форма зарегистрированных сигналов (отсутствие поляризации на горизонтальных каналах) позволило предположить, что записываемые сейсмической станцией импульсы распространялись не по земле, а в атмосфере. В литературе [1, 10, 11] описаны случаи регистрации сейсмическими датчиками инфразвуковых сигналов от взрывов и других источников. Наша ситуация подобна. Фрагмент ОЧ РН, движущийся в атмосфере со сверхзвуковой скоростью, порождает ударную волну. Ударные волны первые несколько секунд распространяются со скоростями, превышающими скорость звука, однако затем они вырождаются в звуковые, поэтому необходимые расчеты времени распространения можно проводить в приближении звуковых волн и лучевой акустики. При движении через атмосферу со сверхзвуковой скоростью фрагмент порождает звуковую волну в каждой точке своей траектории. Поэтому если рассматривать неподвижный приёмник (сейсмостанцию) и движущийся мимо него со сверхзвуковой скоростью фрагмент, то на его траектории найдется только один участок, с которого звук придет в точку приема. Причем наиболее интенсивное излучение происходит на высотах в диапазоне 30–18 км, где скорость фрагментов достаточно высока, и плотность атмосферы достаточна для распространения звуковой волны [2]. Вследствие резкого снижения скорости падения фрагментов при входе в плотные слои атмосферы, их скорость переходит в дозвуковую (когда излучение ударных волн уже не происходит) на высотах ниже 18 км.

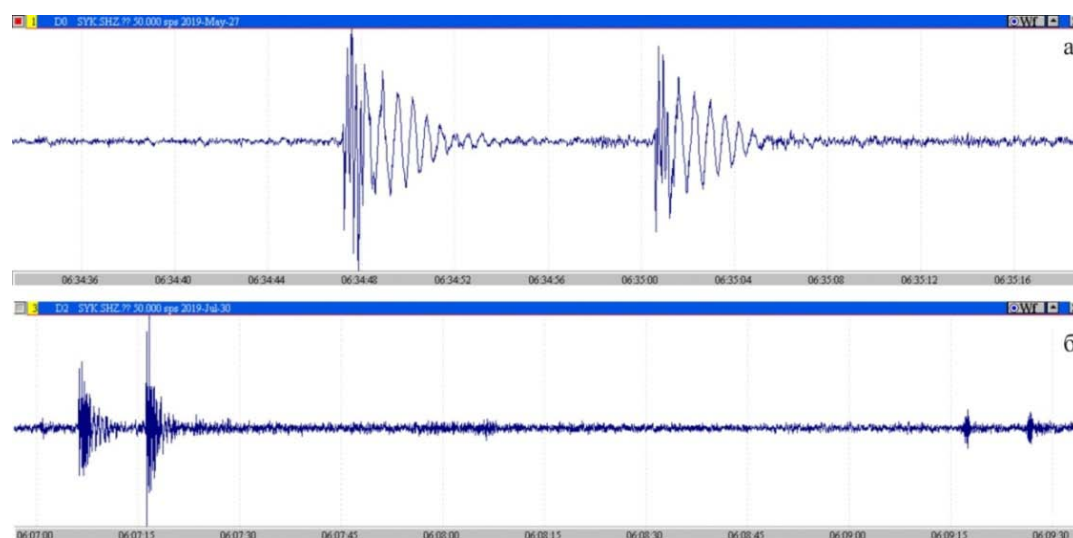


Рис. 3. Инфразвуковые сигналы отделяющихся частей ракеты-носителя «Союз-2.1б» 27 мая 2019 г. (а) и «Союз-2.1а» 30 июля 2019 г. (б), зарегистрированные сейсмической станцией «Сыктывкар». Z-компонента

Ввиду ограниченного объема статьи схемы возможной трассировки звуковых лучей для разных погодных условий не приводятся. Отметим лишь, что при некоторых параметрах атмосферы (прежде всего встречный ветер) существуют условия, когда звуковая волна теоретически не может достигнуть приемника, а при некоторых условиях, как показано на рис. 4, от одного источника сигнала может наблюдаться три прихода на один и тот же приемник.

В левой части рис. 4 отображена стандартная модель атмосферы MSIS, где красной линией выделена усредненная температура на разных высотах. Распределение температуры в атмосфере таково, что имеются три градиентные зоны, образующие естественные звуковые волноводы или способные служить отражающими границами. Нижний волновод расположен на высоте тропопавзы (около 10 км) и в нашем случае он находится ниже источника формирования звукового сигнала, поэтому отражение от него не происходит. Второй волновод расположен на высоте стратопавзы (примерно 40–45 км) и отмечен на рис. 4 как ОГ1. Верхний волновод обычно лежит в диапазоне высот около 80–90 км и соответствует высоте мезопавзы. На рис. 4 он отмечен как ОГ2. Исходя из траекторных расчетов, при взаимном расположении источника и приемника сигнала на расстоянии 95 км (от сейсмостанции до района падения) высота источника излучения должна быть не менее 30 км. В противном случае, прямая волна (путь S1), просто не дойдет до станции, т. к. вследствие изменения температуры с высотой путь ее распространения не прямая, а гипербола. В то же время, при определенных атмосферных условиях (как, например, на рис. 4) до сейсмостанции могут прийти

сигналы и по траекториям S2 и S3, отразившись от границ 1 и 2. Причем время прохода волны по пути S2 будет больше чем по пути S1, а по пути S3 больше чем по пути S2. Естественно и интенсивность зарегистрированных отраженных волн также будет ниже. В большинстве случаев, вследствие рассеивания, волна S3 вообще не будет наблюдаться, что и подтверждают данные наблюдений. Волна S2 также может быть не всегда зарегистрирована, если высота отражающего слоя будет изменена, как по направлению вверх, так и вниз, т.к. в этом случае изменяются углы падения и отражения и фронт волны попадет в другую точку на поверхности земли. Таким образом, следует признать, что регистрируемые сейсмостанцией «Сыктывкар» сигналы распространялись не в литосфере, а в атмосфере.

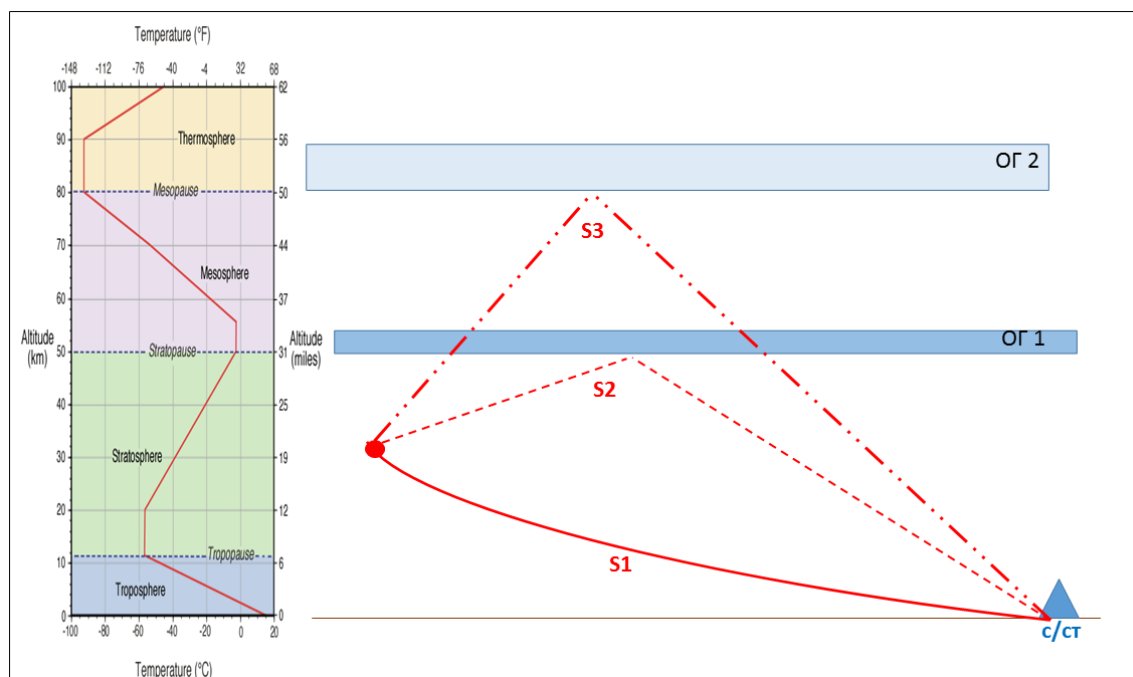


Рис. 4. Схема трассировки лучей, при котором может наблюдаться 3 разных прихода на приемник от одного источника сигнала. ОГ1 – отражающая граница 1, ОГ2 – отражающая граница 2, c/ст – сейсмостанция, S1–S3 – возможные траектории распространения звукового сигнала. В левой части – стандартная модель атмосферы MSIS [15]

Заключение

Результаты наблюдений показали принципиальную возможность регистрации сейсмической станцией «Сыктывкар» инфразвуковых сигналов, распространяющихся в атмосфере. Источником таких сигналов являются снижающиеся со сверхзвуковой скоростью отделяющиеся части ракеты-носителя «Союз-2», падающие в отведенный район падения «Железнодорожный» Республики Коми. То, что эти сигналы инфразвуковые, подтверждается расчетным временем прихода, частотным спектром. В зависимости от состояния атмосферы от одного источника сигнала могут наблюдаться множественные приходы на станцию, вызванные отражением от градиентных границ в атмосфере (стратопазы и мезопазы). Интенсивность каждого последующего прихода снижается в связи с рассеиванием. Также отмечается, что средняя скорость распространения сигнала в зимние месяцы ниже, чем в другие сезоны из-за снижения скорости звука в атмосфере с понижением температуры. В то же время регистрация сигналов в зимний период более уверенная в связи с большей стабильностью атмосферы зимой. К сожалению, по данным одной станции невозможно делать выводы о вероятных местах падения фрагментов.

На рис. 5 приведены планируемые трассы запуска РН «Союз» и «Ангара» с космодрома «Восточный» и расположенные на Дальнем Востоке РФ сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН. Расположение нескольких станций вдоль трасс запуска позволит не только фиксировать описанные выше сигналы, но производить локацию мест падения фрагментов, как в заданные РП, так и в случае аварийных запусков, что позволит существенно ускорить их последующий поиск.

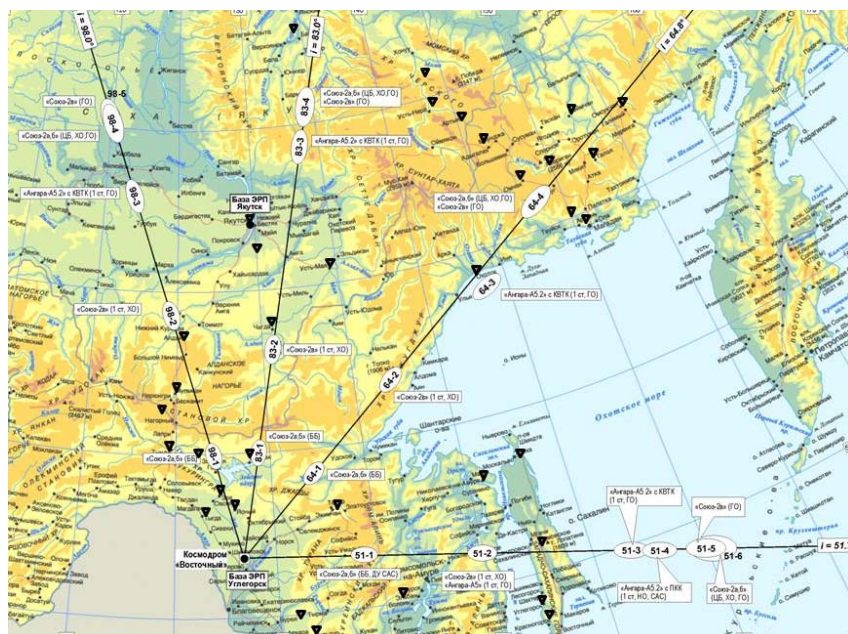


Рис. 5. Трассы запуска РН «Союз» и «Ангара» с космодрома «Восточный». Треугольники – сейсмические станции ФИЦ ЕГС РАН

Список литературы

1. Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12. № 2. С. 300–307.
2. Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Воронин А.И., Федоров А.В., Чигерев Е.Н., Роскин О.К. Определение мест падений фрагментов ракет-носителей по данным инфразвуковых наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 6. С. 707–715.
3. Геоинформационный портал Республики Коми URL: <http://gis.rkomi.ru/GisViewer/RKomiMap>. Дата обращения 05.08.2019.
4. Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». URL: <https://www.roscosmos.ru/480/>.
5. Жителей Корткеросского района предупредили о падении фрагментов ракеты-носителя // Информационное агентство БНК. Новости 14.06.2018. URL: <https://www.bnkomi.ru/data/news/80111/>. Дата обращения 05.08.2019.
6. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми сообщает, что 30 июля т.г. с космодрома «Плесецк» будет произведен пуск ракеты-носителя «Союз-2» // Официальный сайт Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды. Новости 29.07.2019. URL: <http://mpr.rkomi.ru/left/newsanons/news/77537/>. Дата обращения 05.08.2019.
7. Писенко Е.Г., Ефременков А.А., Болоболкин Е.Б. Техническое обеспечение экологической безопасности в районах падения отделяющихся частей ракет-носителей при пусках с космодрома Байконур // Приоритетные задачи экологической безопасности в районах падения Сибирского региона и пути их решения. Издательство «Спутник». Москва, 2016. С. 24–28.
8. Уважаемые жители Корткеросского района! // Официальный портал муниципального образования муниципального района «Корткеросский». Новости 13.06.2018. URL: http://kortkeros.ru/novosti/news_post/uvazhayemyye-zhiteli-kortkerosskogo-rayona-136. Дата обращения 05.08.2019.
9. Успешный пуск ракеты-носителя «Союз-2.1а» с Плесецка // Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос». Новости 30.07.2019. URL: <https://www.roscosmos.ru/26616/>. Дата обращения 01.08.2019.
10. Evers L.G., and Schweitzer J. A climatology of infrasound detections in northern Norway at the experimental ARCI array // J. Seismol. 2011. V. 15 No. 3. P. 473–486. doi: 10.1007/s10950-011-9237-8.
11. Gibbons S.J., and Ringdal F. Detection and analysis of near-surface explosions on the Kola Peninsula // Pure Appl. Geophys. 2010. V. 167. P. 413–436. doi: 10.1007/s00024-009-0038-8.
12. Hedim A.E., Fleming E.L., Manson A.H., Schmidlin F.J., Avery S.K., Clark R.R., Franke S.J., Fraser G.J., Tsuda T., Vial F., Vincent R.A. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 1421–1447.
13. McCoy R.L., "MC drag" – a computer program for estimating the drag coefficients of projectiles, US Army Armament Research and Development Command, Ballistic Research Laboratory. Tech. Rep. ARBRL-TR-02293. 1981.
14. Nippress A., Green D.N., Marcillo O.E., and Arrowsmith S.J., Generating regional infrasound celerity-range models using groundtruth information and the implications for event location // Geophys. J. Int. 2014. V. 197. P. 1154–1165. doi: 10.1093/gji/ggu049.
15. U.S. Standard Atmosphere. USA, Washington DC: NASA, U.S. Government Printing Office, 1976. 241 p.