

РАЗРАБОТКА АЭРОМЕТОДОВ КАРТИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОЗДАНИЕ АЭРО- И НАЗЕМНЫХ СЕТЕЙ МОНИТОРИНГА*†

И. С. ГРАМБЕРГ, Л. П. ГЕОРГИЕВСКАЯ
В. А. КАЛИНИН, В. К. ПАЛАМАРЧУК
ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия

По результатам аэронаблюдений выделяются вероятные очаговые зоны, в пределах которых выполняются наземные наблюдения с целью мониторинга выделенных очагов; производится прогнозирование землетрясений и вызываемых ими волн цунами.

В настоящее время практически не существует единой физически обоснованной и практически проверенной модели очага землетрясения, однако сейсмологи сходятся в том, что для ее создания необходимо достоверно знать геолого-геофизическое строение очаговых зон и окружающего их пространства. Основными методами исследования сейсмоактивных районов, особенно на акваториях, являются геофизические.

Несмотря на большие объемы геофизических исследований, проводимых в сейсмоактивных районах, в том числе на акваториях, глубинное строение таких районов изучено недостаточно. Последнее вызвано тем, что обычно в горных сейсмических районах, расположенных как вдали от акваторий, так и в непосредственной близости к ним, аэромагнитные и другие съемки выполняются на высотах, близких к вершинам гор, или путем огибания рельефа. При этом на результаты аэромагнитной и других видов съемок накладывается значимое влияние рельефа, которое пока надежно не учитывается. Поэтому глубинное геологическое строение в горных районах изучено недостаточно, и его корреляция на акватории теряет смысл. Подобные ошибки характерны и для наземных гравиметрических съемок благодаря аномальному вертикальному градиенту, создающему ложные рельефные аномалии Буге, соизмеримые с аномалиями от глубинных объектов. Исследование переменного магнитного (вариации геомагнитного поля Земли) и естественного электромагнитного поля (ЭМИ) в горных районах также затруднено из-за влияния рельефа. От большинства перечисленных помех, обусловленных неровностями рельефа, можно избавиться, если наблюдения выполнять на высотах 9–10 км над уровнем моря.

Большие трудности при исследовании постоянного магнитного поля Земли, естественного ЭМИ и многих других геофизических полей создают суточные (солнечносуточные, лунносуточные) вариации геомагнитного поля, магнитные возмущения (бури) [5] и вариации естественного ЭМИ, суточный и сезонный ход которого обусловлен грозовой активностью и условиями распространения в волноводе Земля — ионосфера [4]. Помехи такого

*© И. С. Грамберг, Л. П. Георгиевская, В. А. Калинин, В. К. Паламарчук, 1997.

†Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

рода — вариации исследуемого параметра, очень трудно учитывать при наземных наблюдениях, так как число вариационных станций (особенно в горных районах и/или на побережье и акваториях) должно быть велико. В то же время методика, разработанная во ВНИИОкеангеология [3], позволяет надежно оценивать вариации исследуемых полей косвенным способом по данным аэрогеофизических съемок. Наконец, как показано В. К. Паламарчуком в 1982 — 92 гг., аномальные значения вариаций геомагнитного поля могут быть оценены по данным аэромагнитной съемки. Нет никаких препятствий и для оценки подобных аномалий ЭМИ.

Таким образом, аэрогеофизические исследования позволяют избавиться от влияния рельефа дневной поверхности и приповерхностных неоднородностей, не требуют установки плотной сети вариационных станций, значимо снимают воздействие техногенных помех и быстро выполняются на больших территориях, захватывая при этом и сушу, и море. М. Б. Гохберг, В. А. Моргунов и Е. Л. Аронов [1] обращали внимание на вероятную локализацию источников ЭМИ над земной поверхностью в атмосфере (или ионосфере) наряду с генерацией ЭМИ в глубинах земной коры. В. В. Мигулин и В. И. Ларкина приводят примеры аномальных электромагнитных эффектов, зарегистрированных с помощью спутников [2]. В 1992 — 95 гг. нами были выполнены исследования ЭМИ на акваториях, выделены зоны напряжений в земной коре, которые хорошо коррелируются с сейсмогенными геологическими структурами.

Учитывая фиксированные орбиты спутников, ограниченность передвижений на суше и на акваториях, зашумленность измерений вблизи соленой морской воды и практическое подтверждение возможности измерения ЭМИ в воздухе, можно с уверенностью сказать, что аэрогеофизические съемки естественных магнитных и электромагнитных полей позволят еще на один шаг приблизиться к надежному решению задачи предсказания землетрясений, в том числе на акваториях, которые с большой вероятностью приводят к образованию цунами.

Поиск и отслеживание сейсмических очагов с аэроносителей по аномальному излучению электромагнитного поля и другим геофизическим признакам представляется особенно привлекательным. При аэронаблюдениях в поле зрения будет находиться значительная часть объекта, в силу чего влияние местных помех сводится к минимуму. С другой стороны, наблюдения, выполняемые на значительной по размерам площади в течение короткого промежутка времени, позволят выделить предполагаемый аномальный район как наиболее отличающийся от окружающего обрамления по геофизическим аномалиям и соответственно по сейсмической активности.

Картирование очагов землетрясений с самолета позволяет получить материал о динамике развития сейсмических событий, повышает точность и оперативность прогнозов наступления этих событий и проявления вызываемых ими волн цунами на акваториях.

По результатам аэрогеофизических исследований выделяются места для стоянок наземных станций, регистрирующих аномальные эффекты от вероятных очагов. Наземные измерения на обсерваториях и аэросъемка на отдельных оценочных профилях осуществляют мониторинг очаговых зон на суше и над акваториями.

Современная стратегия прогноза землетрясений на суше и над акваториями сводится к обнаружению долгосрочных и краткосрочных предвестников землетрясений. Многие из геофизических методов выделяют временные аномалии регистрируемых параметров, которые играют роль предвестников землетрясений. До сих пор такие аномалии оценивались в результате наземных (в основном обсерваторских) исследований и в сравнительно небольших объемах на одиночных профилях. Площадные исследования позволяют надеж-

но оценить аномалии геофизических параметров, являющиеся предвестниками.

Предвестники — это аномалии геофизических параметров, отражающие физическое состояние среды очага и характеризующие его состояние. Предвестники проявляются при приближении момента землетрясения. Наиболее надежными предвестниками служат аномалии, являющиеся следствием физических процессов, протекающих в очаговой зоне, и образующиеся одновременно с большинством других аномалий исследуемых параметров. Аномалии-предвестники могут иметь различную продолжительность и разную конфигурацию (например, наличие повышенных или пониженных значений параметра в начале или конце аномального периода) в зависимости от характера проявления очаговых процессов в исследуемых полях. Интенсивность аномалий-предвестников, характеризующих состояние очага землетрясения, зависит от расстояния до центра очага и изменяется по площади, в связи с чем поиск предвестников должен выполняться только по площади. При обнаружении аномалий-предвестников в одной точке (одиночная обсерватория) в измененных значениях может присутствовать большое число ложных (не связанных с очагом) аномалий. Примером последних является вековой ход МПЗ, выделяемый среди множества аномалий суточных вариаций геомагнитного поля, образующихся за счет неоднородной проводимости.

Задача обнаружения предвестников землетрясений сводится к задаче поиска объектов. Ее решение производится с помощью направленных (компонентные сейсмоприемники, магнитометры-градиентометры, ферритовые и/или рамочные антенны, компонентные приемники электромагнитного излучения (ЭМИ) и магнитного поля Земли (МПЗ) и др.) и ненаправленных (магнитометры модульные, газоанализаторы и др.) средств поиска, которые характеризуются своими дальностями обнаружения — линейной и круговой зонами соответственно.

С помощью направленных и ненаправленных средств поиска выполняются аэро- и наземные площадные, профильные и точечные наблюдения. В первом случае системы поиска устанавливаются в узлах сети, которая выбирается исходя из заданной вероятности обнаружения предвестников. Если направление на источник поиска известно, то каждый из измеряемых признаков (потенциальный предвестник) исследуется единичным средством поиска, в противном случае измеряемые станции располагаются по сети треугольников, обеспечивающих прием сигналов по любым направлениям.

Выделение аномалий-предвестников основано на том, что их характер распределения во времени и в пространстве $\Delta f_p(, , t)$ отличается от временной зависимости геофизического параметра $\Delta f_g(, , t)$ на площади, обусловленной геологическим строением (g). Аномалии $\Delta f_g(,)$ и их временное изменение по площади носят обычно более изменчивый характер по сравнению с Δf_p и могут быть легко отфильтрованы. Если же аномалии $\Delta f_g(,)$ носят региональный характер и имеют изменение во времени, то в качестве предвестника выступает аномалия

$$\Delta f_{gp}(,) = \Delta f_g(, , t_1) - \Delta f_g(, , t_2), \quad (1)$$

где t_1 и t_2 — времена двух разнесенных во времени съемок (повторные съемки). Если съемки в t_1, t_2, \dots, t_k следуют друг за другом на достаточно малом (для краткосрочных предвестников) или достаточно длительном (для долгосрочных предвестников) промежутках времени, то будем говорить о мониторинге исследуемой среды, а технические средства измерения параметра f , методику измерения, сеть и способы обработки и интерпретации называем мониторинговой системой.

Выделим основные пути исследования геофизических аномалий предвестников землетрясений.

1. Непосредственные измерения геофизического параметра (на спутнике, на самолете, на Земле, в скважине, в воде), все аномалии которого являются предвестниками; иначе говоря, в этом случае измеренное значение параметра f может быть представлено аддитивной случайной моделью

$$f(t) = \Delta f_p(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где Δf_p — аномалия-предвестник; $\varepsilon(t)$ — случайная помеха.

2. Непосредственные измерения геофизического параметра, аномалии которого связаны с суточным (месячным, годовым, вековым) изменением исследуемого параметра, зависят от геологических, метеорологических и других факторов (Δf_g) и содержат аномалии-предвестники (Δf_p) известной и/или неизвестной формы, т. е. измеренные значения могут быть представлены аддитивной случайной моделью

$$f(t) = \Delta f_p(t) + \sum_{i=1}^m \Delta f_{gi}(t) + \varepsilon(t), \quad (3)$$

где m — число мешающих факторов.

3. Косвенные оценки исследуемого параметра (например, аномалии вариаций магнитного поля Земли, вычисленные по разности вариаций, измеренных на МВС, и их оценок, найденных по косвенному способу), который может либо иметь только аномалии-предвестники, либо состоять из суммы различных аномалий.

4. Обнаружение комплексных аномалий-предвестников по последовательности появления аномалий отдельных параметров, их сочетанию и/или уникальности (редко или совсем не наблюдавшихся до сих пор значений или сочетания значений).

Для интерпретации аномальных эффектов предвестников, в том числе для объяснения, почему они не появляются перед некоторыми землетрясениями либо появляются в неожиданные сроки, необходимо хорошо знать геолого-геофизические характеристики пунктов наблюдений, на которых зарегистрированы аномалии. Обычно такие пункты выбираются исходя из удобства установки соответствующей аппаратуры, а это не всегда удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям. Очевидно, что эффекты в точке исследования должны отражать состояние очага землетрясения и/или его окружающей среды (оболочки). Это, однако, трудно выполнимо в горных районах, вблизи границ раздела вода — суша и на акваториях, где возникает целый ряд дополнительных аномальных явлений, не связанных с очаговыми зонами. Такие аномальные явления служат помехой как при оценке геофизических аномалий-предвестников, так и при изучении геологического строения.

Обнаружение и картирование вероятных очагов землетрясений по неоднородности гравимагнитного поля и аномалиям ЭМИ относится к долгосрочному прогнозу, на основании которого строятся системы краткосрочного прогноза. Картирование очагов землетрясений относится к начальному (региональному) этапу исследования сейсмоопасных зон, без чего все остальные исследования могут быть выполнены неудовлетворительно. Увеличивая масштаб регионального картирования, мы переходим к среднему масштабу, а затем к крупномасштабным, или детальным, исследованиям. При укрупнении масштаба поисковых работ изменяются решаемые сейсмологические задачи, которые теперь охватывают диапазон от картирования вероятных очагов землетрясений до картирования внутренней структуры очага и обнаружения краткосрочных предвестников.

Увеличение масштаба сейсмологических исследований производится за счет либо более детальных аэрогеофизических исследований, либо одновременного перехода на наземные исследования. Участки наземных исследований и точки установки наземных станций

выбираются по данным аэрогеофизических съемок. Необходимо, чтобы между точками установки наземных станций (МВС, обсерватории и т.п.) и очагами землетрясений не было значимых неоднородностей в геологическом строении, влияющих на распространение исследуемого признака.

Система геофизических исследований должна обеспечивать изучение геологического строения района, оценку геофизических характеристик глубинных слоев земной коры и установление по ним каналов связи очага с точками измерения, выделение долгосрочных и краткосрочных предвестников и в итоге осуществлять мониторинг очаговых зон. К примеру, такая система может состоять из следующих измерительных подсистем:

1 — магнитный канал — для изучения магнитного поля Земли, в том числе напряженности полного вектора и его составляющих-компонент, вертикального и горизонтального градиентов и переменной составляющей (вариаций); погрешность измерения напряженности МПЗ составляет $\pm 0.01\text{--}0.1$ нТл, горизонтального градиента $\sim \pm 0.01$ нТл, вертикального градиента ± 0.005 нТл, компонент МПЗ ± 1 нТл;

2 — гравиметрический канал — для изучения аномалий силы тяжести; погрешность измерения поля силы тяжести для аэроизмерений составляет ± 0.5 мГал, для наземных измерений — ± 0.01 мГал;

3 — электромагнитный канал — для изучения естественного электромагнитного поля Земли и его вариаций (чувствительность регистратора ЭМИ $\pm 0.1 - 10^{-6}$ В/м) и искусственного излучения радиостанций (метод СДВР);

4 — навигационный канал — для координирования носителя при аэросъемках; погрешность навигации $\pm 10\text{--}25$ м;

5 — дополнительные каналы устанавливаются для оценки различных свойств дневного рельефа, атмосферы и ионосферы и формируются по мере накопления информации об очаге.

На этапе выделения предполагаемых сейсмоопасных районов аэрогеофизическая съемка выполняется на больших (8–10 км) высотах в масштабе 1:1 000 000 — 1:500 000 по сети параллельных маршрутов с прохождением ряда секущих. Секущие маршруты наряду с вариационными станциями служат для контроля вариаций геомагнитного поля и естественного электромагнитного излучения и оценки их аномалий. Комплексная интерпретация результатов региональных аэрогеофизических исследований производится с целью оценки глубинного геологического строения и напряженного состояния земной коры, а также выделения районов, в которых необходимо проводить более детальные наблюдения. Последние выполняются в более крупном масштабе (1:200 000 — 1:100 000) на разных высотных уровнях с целью получения объемных моделей предполагаемых очаговых зон. Одновременно по результатам аэронаблюдений производится выбор точек установки наземных станций. Выполняются обработка и комплексная интерпретация данных для оценки внутренней структуры очаговых зон и выбора маршрутов для мониторинга (таблица).

Дальнейшее укрупнение масштаба аэрогеофизических съемок (до 1:50 000) с уменьшением высоты полета до 0,1–1 км служит для детального картирования и мониторинга очаговых зон и обнаружения краткосрочных предвестников землетрясений.

Наземные наблюдения (район исследований и сети) планируются по результатам интерпретации аэронаблюдений, которая в свою очередь выполняется с целью выделения

Сети комплексных геофизических наблюдений
сейсмоактивных территорий и акваторий¹

Наименование съемки	Масштаб	Вид съемки	Высота	Цель	Примечание
Глобальная (мировая)	1:50000000 1:25000000	Спутниковая	100–200 км	КОЗ, ДсП, КсП	при М
Мелкомасштабная	1:25000000 1:10000000	Аэро	8–10 км	ДОЗ, ДсП	
Среднемасштабная	1:500000	Аэро	4–6 км	КОЗ, КО	
Крупномасштабная	1:100000	Аэро	0.2–0.5 км	КО, ДсП, КсП	
	1:25000	Наземная	0–2 м		при М
	1:10000				
Профильные и точечные станции в зоне поиска	1:5000	Наземная	0–10 м	КО	
	1:1000		0–(–n км) (скваж.)	ДсП КсП М	
Обсерватории		Наземная, подводная	(+10 м)– (–n км)	Региональный М ДсП КсП МО	

¹КОЗ — картирование очаговых зон, КО — картирование очагов, ДсП — долгосрочные предвестники, КсП — краткосрочные предвестники, М — мониторинг, МО — мониторинг на обсерваториях.

объектов, районирования и оценки глубинных неоднородностей и оценки распространения квазиоднородных масс геологических образований в очаговых зонах и вокруг них. При интерпретации делается попытка наметить вероятные области очага и его оболочки, оценить вероятные спусковые механизмы и пути (зоны) их связи с удаленными обсерваториями.

Наземные пункты наблюдения выбираются так, чтобы они были связаны волноводами с очагом и/или принадлежали одной и той же геофизической (однородной) среде и/или не имели на пути следования сигнала от очага слишком много неоднородностей. Если такие связи не вполне удовлетворяют требуемым условиям, наземные и воздушные маршруты мониторинговой системы должны их улучшить либо заменить сами условия путем выхода в очаговую зону от наземного пункта наблюдений или проведения наблюдений на протяженных маршрутах.

Наземные наблюдения осуществляют непрерывный мониторинг очаговых зон и выполняются системами, состоящими, например, из трех сейсмографов, трех магнитометров и трех датчиков электромагнитного излучения и других параметров, установленных в вершинах треугольной сети для регистрации градиентов исследуемых полей и их аномалий по любым направлениям. Все измерения в этом случае будут записаны в базы данных экспертных самообучающихся систем, идентифицирующих очаги землетрясений, осуществляющих обнаружение предвестников и прогнозирующих время наступления сейсмического события и прихода цунами в реальном масштабе времени.

Мониторинг проводится по сети отдельных разновысотных площадных съемок, аэро-маршрутов, наземных маршрутов и отдельных пунктов.

Принятие решения на любом этапе развития сейсмических событий сопровождается

оценкой его надежности.

Заключение и выводы.

В работе предложены технологии аэрометодов картирования очагов землетрясений на суше и акваториях по аномалиям геофизических полей и создания аэро- и наземных сетей мониторинга сейсмоактивных зон и систем оповещения о цунами. Выполнение этой задачи осуществляется путем разработки аэро- и наземной аппаратуры, создания аэро- и наземных геофизических комплексов на базе разработанных и существующих геофизических приборов на основе компьютерных технологий, создания методики наблюдений (сети, высоты, период и продолжительность наблюдений и др.), способов обработки и интерпретации полученных данных, в том числе в реальном масштабе времени и с использованием экспертных самообучающихся систем.

Технология аэрометодов, разработанная для акваторий, может быть применима и на суше.

Аэронаблюдения, включающие в себя измерения геомагнитного поля, его компонентов и градиентов, гравитационного поля, естественного и искусственного электромагнитного поля и других параметров, выполняются с помощью аэрогеофизической лаборатории, установленной на борту самолетов типа ИЛ-18Д (АН-30, АН-74), вертолетов типа МИ-8, КА-24 и др. По мере накопления информации и в зависимости от условий конкретной решаемой задачи комплекс аэрогеофизических исследований может изменяться. Аэролаборатория при этом должна оснащаться аппаратурой спутниковой навигации.

Мониторинг может быть надежным, если к его выполнению привлечь население (школы, местные органы власти) и широко использовать гражданскую авиацию и суда рыболовецкого и торгового флота, на борту которых установлены минимальные комплексы автоматической аппаратуры, позволяющие попутно исследовать состояние сейсмоопасных зон.

Список литературы

- [1] ГОХБЕРГ М. Б., МОРГУНОВ В. А., АРОНОВ Е. Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности. *Докл. АН СССР*, **248**, №5, 1979, 1077–1081.
- [2] МИГУЛИН В. В., ЛАРКИНА В. И. *Обнаружение эффектов воздействия землетрясения на ОНЧ-КНЧ шумы во внешней ионосфере*. ИЗМИРАН, М., препринт №25 (390), 1982.
- [3] ПАЛАМАРЧУК В. К. Учет вариаций геомагнитного поля и увязка наблюдений при высокоточных аэромагнитных съемках. *Геология и геофизика*, №10, 1983.
- [4] *Электромагнитные предвестники землетрясений* (Под ред. акад. М. А. Садовского). Наука, М., 1982.
- [5] ЯНОВСКИЙ Б. М. *Земной магнетизм*. Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1964.

Поступила в редакцию 15 апреля 1995 г.