



Дистанционни аерокосмически технологии в сеизмологията

Гаро Маргирисян

Задачата за изследване на тези параметри на огромни територии, обхващащи стотици и хиляди квадратни километри върху земната

повърхност, в земните недра и в атмосферата, при това с необходимата висока точност, надеждност, мащабност, експресност и оперативност, може да бъде решавана ефективно само чрез използване на аерокосмически методи, технологии и технически средства.

Космогеология

Най-важната предпоставка за очертаване на сеизмоопасните райони е определянето на геоложката обстановка. Космическите методи и средства са в състояние да дават много ценни сведения за геоложките процеси – както за тези, които са се развивали в стари геоложки времена, така и за продължаващи в по-нови епохи, и за съвременни.

Силните земетресения се предхождат от аномално изменение на редица различни параметри – геофизични, геоложки, геогеохимични, геоелектрични и др. – в района на бъдещия епицентър.

С появяването и развитието на космическите изследвания, и в частност на дистанционните аерокосмически методи и средства,

геолозите, включително и занимаващите се с изучаване на причините, прогнозирането и последиците от силните земетресения, получиха ново мощно и уникално изследователско средство. Уникалността на дистанционните аерокосмически снимки по отношение на геологията се дължи преди всичко на големия им обзор, обективността при изобразяване на земната повърхност и естествената им интеграция и генерализация. Поради всичко това днес геологията заема едно от централните места сред науките, използващи аерокосмическите технологии за решаване на задачите си. Мащабното внедряване на новите космогеологични методи в геоложките изследвания е основание за оформяне на ново научно направление – *космическа геология*, или *космогеология*.

Особен интерес за прогнозирането на земетресения представляват разломите – местата на пресичане на отделните геоложки структури. Това са именно лабилните зони, по които става придвижването на земните блокове един спрямо друг и се освобождава сеизмична енергия, т.е. стават земетресения. Обикновено на космическите изображения разломните нарушения се разкриват предимно въз основа на геоморфоложки признаци – формите на релефа на земната повърхност, произхода и измененията, настъпващи в тях под действието на външни и вътрешни земни сили, и др.

Изучаване на сеизмоактивни разломи чрез дистанционни снимки

При дешифрирането на космически снимки се потвърждават известни стари разломи и се откриват нови такива. Установен

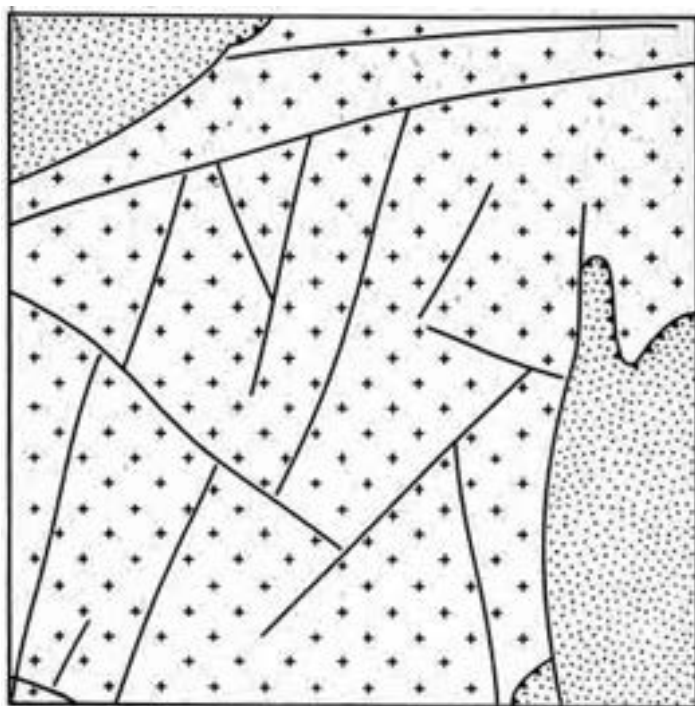
е един много важен факт. Още при първите опити за дешифриране на космически снимки се оказва, че на тях се изявяват образувания, незабележими при изучаване на повърхностния слой на земната кора чрез традиционните геоложки методи. Изяснява се, че тези образувания съответстват по структура на слоеве, намиращи се по-дълбоко и които са установени по геофизични данни. Най-характерен пример за това са *линеаментите*. Те са линейни или дъгообразни структурни елементи на земната кора, обикновено представляващи разломи – разриви на земната кора.

Линеаментите предизвикват интереса на геолозите вече над 150 години, но все още тяхната природа и геоложко значение крият загадки. А това, което днес знаем за тях, до голяма степен се дължи на дистанционните аерокосмически снимки.

Линеаментите имат съществено значение при решаването на един важен прило-



Космическа снимка на сеизмогенния разлом Сан Андреас в Калифорния



*Схема на геологическо дешифриране на космическа снимка.
С линиите са отбелязани разломите*

жен проблем, а именно прогнозирането на сеизмичността.

При геолого-геоморфоложката интерпретация на материалите от космически снимки се очертават границите на сеизмогенните зони. Те се откриват по редица признаци. При разкриването на сеизмогенните зони най-напред се определят активните разломи. В случаите на незначителни отмествания на релефа в зоната на разлома обикновено има повишена ерозионна разчлененост. При по-големи отмествания (от порядъка на стотици метри) се забелязва отчетлива линейна граница, разделяща различните в геоморфоложко отношение райони. Особено отчетливо се забелязват сеизмоактивните разломи на контактите между основни скали и рохкави отлагания.

На космическите снимки сеизмоактивните разломи имат различна морфоложка изразеност, като отделните морфоложки

елементи са представени в различни съчетания. Дълбочинните разломи, които често са източници на сеизмични екокатастрофи, се проявяват на космическите снимки като зони, включващи разривни и нагънати дислокации, дайки и интрузии. В районите с мощна обвивка от рохкави отлагания дълбочинните разломи се фиксират по геоморфоложки признаци: рисунък на речната мрежа, линейни форми на релефа и др.

Като резултат от дешифриране на космически снимки и съпоставяне на получената информация с геоложка, геоморфоложка и геофизична информация, получена по традиционните наземни методи, се получава възможност за класифициране на разломите по дължина, ширина, дълбочина и т.н. Такава класификация

позволява отделянето на различни по размери блокове на земната кора, отличаващи се по ландшафтни признаци. За съседни блокове, изпитващи тектонски движения в различни посоки, е характерна рязка разлика в строежа на релефа, състава на скалите, растителната покривка и т.н. За блокове, движещи се в една посока, но с различни интензивности, подобни разлики в строежа на релефа са по-слабо забележими, докато разликите в характера на растителната покривка и в строежа на хидроложката мрежа са изразени отчетливо.

Установено е, че съществува връзка между магнитуда на земетресенията и дължините и дълбочините на сеизмогенните разломи, размерите на ограничените от тях блокове на земната кора, неравномерността при преместване на отделните блокове по разломите и т.н.

Обаче галеч не всички разломи са сеизмогенни. Различаването на сеизмогенните

разломи от асейсмичните става по няколко признака: по исторически и съвременни сейсмични дислокации и по макросейсмични и апаратурни данни. На космически снимки с достатъчна надеждност могат да се отделят два вида сейсмични дислокации: сеизмотектонски и сеизмогравитационни. Те се установяват чрез последователен анализ на космически снимки, направени преди и след земетресението.

Вече съществуват стотици хиляди космически снимки практически на цялата земна повърхност, на базата на геоложкото дешифриране и интерпретиране на които са получени редица различни карти на линеаменти и са направени различни изводи.

Важно значение за дистанционното изучаване на линеаментите имат и визуалните наблюдения от борда на пилотиран космически кораб, орбитални станции и космически совалки.

Аерокосмически методи при изучаване на последствията от катастрофални земетресения

В генетично отношение явленията, съпътстващи едно земетресение, могат да се подразделят на три вида: сеизмотектонски, сеизмохидродинамични и сеизмогравитационни. Изследванията на тези явления чрез аерокосмически технологии определят качествено нов етап в проучванията.

До началото на 90-те години на миналия век за дистанционно изучаване на сеизмодислокации след катастрофални земетресения се използват главно фотографски снимки във видимия и близкия инфрачервен диапазон. Динамиката на развитие и сложността на геоложките структури, обект на тези снимки, както и обективните затруднения при неблагоприятни метеорологични условия мотивират търсенето на възможности за използване и на други области на електромагнитния спектър и преди всичко на радиодиапазона. Основното предимство на радиолокационните снимки при такива изследвания е проникващата способност

на радиосигнала, която дава възможност за получаване на информация и за обектите и структурите, намиращи се в дълбочина, маскирани от растителна или почвена покривка, наноси и т.н.

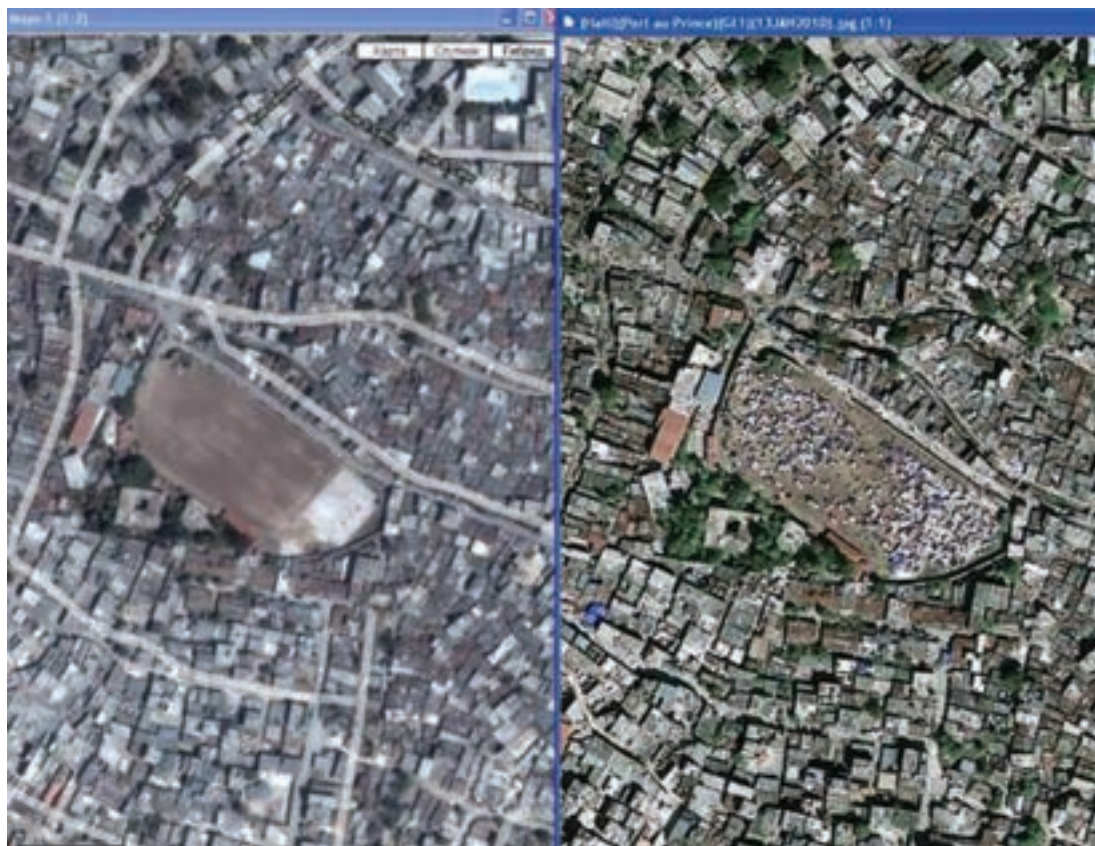
Редица примери от практиката потвърждават високата ефективност на космическите радиолокационни изображения. По отношение на активните тектонски структури тези изображения показват висока информативност дори и в условия на планински, силно и дълбоко разпокъсан релеф, като позволяват изучаването не само на регионални, но и на достатъчно детайлни локални структури.

Дистанционни аерокосмически снимки са използвани много успешно и за изучаване на сеизмодислокациите след катастрофални земетресения. Чрез тях се прави привързване на районите на поражения със зоните на активизираните разломи, както и уточняване и оценяване на щетите, нанесени на населените места.

Очевидно е, че използването на дистанционна аерокосмическа информация дава възможности оперативно и с висока степен на обективност да се изучат и охарактеризират условията за възникване на отрицателните ефекти на сейсмичните екокатастрофи. Така може да се прогнозира опасно уязвими участъци при микросейсмичното райониране и при други инженерно-геоложки мероприятия.

Дистанционно изследване на някои сеизмопредвестникови параметри

Явленията, предхождащи земетресения, се наблюдават на различни по големина територии. Предвестници на силните земетресения са регистрирани на разстояния няколкостотин километра от епицентъра. Едни от тях се проявяват години или месеци преди труса, други само няколко дни и часа, а в някои случаи и само минути преди това. Тук накратко ще разгледаме само някои сеизмопредвестникови параметри, които могат да се изследват чрез аерокос-



Космически снимки от столицата на Хаити Порт о Пренс преди (вляво) и след (вдясно) катастрофалното земетресение на 12 януари 2010 г. В центъра на снимките е градският стадион, в който след трусовете е организиран временен лагер

мически методи и средства, а именно – деформация на земната повърхност, аномално изменение на нивото на подпочвените води и температурни аномалии на повърхностния земен слой.

Деформации на земната повърхност

Безспорно е, че аномалното движение на земната повърхност, водещо до деформирането ѝ, е един от основните предвестници на сеизмична екокатастрофа. При това силата на земетресението е свързана с размерите на областта, в която става неговата подготовка. Това означава, че едно катастрофално земетресение би трябвало да деформира големи области от земната повърхност.

Движението на земната кора, ставащо на големи територии, може да се изучи единствено чрез геодезична снимка. Тя се прави въз основа на два основни метода: триангулация – чрез която се определя хоризонталното положение на точките от земната повърхност, и нивелация – определят се височините им спрямо морското равнище. Получените точки се фиксират върху земната повърхност във вид на репери и триангулационни точки. След време при повторни геодезични измервания може да се отчете промяната в тези положения и височини, а оттам и да се определи движението на земната повърхност.

Прецизни повторни геодезични измервания в редица области на бъдещи земетресения

ния показват, че в период от няколко месеца до няколко години преди труса се изменят средната хоризонтална и вертикална скорост на движение на земната повърхност.

Съществуват и емпирични формули за приблизителни зависимости между предполагаемия магнитуд на земетресението и средния радиус на деформираната област от земната повърхност.

Експресното получаване на геодезични данни за деформации на земната повърхност дава възможност за повишаване при нужда на интензивността на изследване на други сеизмопредвестникови параметри – сеизмични, геофизични, хидроложки, геохимични и др., чрез съгъстяване на наблюдателната мрежа в района, увеличаване на честотата и точността на измерванията и т.н. Изучаването на сеизмичните предвестници по геодезични и космически данни води началото си от около 1973 г. Особено успешно е изучаването на дългосрочните предвестници на специално подбраните за целта геодинамични полигони в сеизмоактивни райони.

Високоточните геодезични измервания с необходимата за прогностични цели експресност стават възможни благодарение на един модерен и бързо развиващ се дял на геодезичната наука – *космическата геодезия*. Тя е раздел от геодезията, в който с космически методи и средства се изучават взаимното разположение на точки от земната повърхност, размерите и формата на Земята и параметрите на гравитационното ѝ поле. Космическата геодезия разполага с два способа, чрез които се постигат необходимите високи точности на следене и изучаване на движенията и деформациите на земната кора в сеизмоактивните зони. Първият е *лазерната локация на геодезичен сателит*, а вторият е *радиоинтерферентният*.

Изключително ефикасни и перспективни при изследване на съвременната геодинамика, а оттам и за прогнозиране на силни земетресения, са измерванията чрез глобални позициониращи системи – GPS (Global

Position System). Използването и на втора честота при тях позволява да се постигне точност от порядъка на милиметри.

Аномално изменение на нивото на подпочвените води

Още в древни японски ръкописи се споменава за изменението на някои параметри – ниво, температура, мътност, соленост, химичен състав и т.н. на подземните води в навечерието на силни земетресения. Всички тези явления са обект на научни изследвания като сеизмопредвестникови параметри при прогнозиране на земетресения. Резултатите потвърждават предположението, че аномалното понижение и повишение на нивото на подземните води е тясно свързано с тектонските деформации, предшестващи земетресенията.

Стационарните измервателни точки в сондажи и кладенци не са в състояние да дават оперативна и ефективна информация за измененията на това ниво, годна за прогнозиране на силни земетресения. Поради това дистанционните аерокосмически методи и средства могат да бъдат много ценни при експресно изучаване на големи територии на аномалното изменение на нивото на подпочвените води.

Използването на дистанционните свръхвисокочестотни (СВЧ) методи позволява получаване на информация и за нивото на подпочвените води. Ако това ниво се използва в качеството на сеизмопредвестников параметър, е нужна информация не толкова за абсолютните стойности, колкото за относителните изменения на нивото. Повишаването на точността на дистанционното измерване на нивото на подпочвените води изисква преди всичко установяване на възможно най-точни калибровъчни съотношения между коефициента на излъчване на почвата, влажността на повърхностния почвен слой и нивото на подпочвените води. Това може да стане чрез използване на регионални бази от данни за радиоизлъчвателните и хидрофизичните характеристики на почвата.

Температура на повърхностния земен слой

Дистанционните аерокосмически методи и технологии могат да бъдат много полезни при изучаване и на друг сеизмопредвестников параметър – аномалните изменения на температурата на повърхностния земен слой в района на предстоящото земетресение.

Вече са натрупани достатъчно факти, които говорят за изменение на температурния режим в повърхностните земни слоеве през периодите на повишаване на сеизмичната активност. Най-напред това е установено в епицентралната област на катастрофалното Тяньшанско земетресение през 1976 г. в Китай. Месеци преди труса метеорологичните наблюдения на обширна територия показват необикновено високо – с около 2 °C, повишение на температурата на почвата.

Повишаването на температурата на земната повърхност преди земетресение може да се обясни с различни причини. Една от тях е изменението на влажността. Аномалното поведение на нивото на подпочвените води в кладенци и плитки сондажи в навечерието на земетръсни екокатастрофи води до колебанията на влажността на почвата. В резултат на това се изменят топлофизичните характеристики, условията на топлообмена, влагообмена и съответно температурата.

Топлинни аномалии в почвата могат да се създадат и чрез други механизми, например локален парников ефект.

Съвременната апаратура за дистанционно изследване на Земята в инфрачервения (ИЧ) диапазон позволява да се осъществи мониторинг на топлинното поле с пространствена разделителна способност, по-добра от 1 км, и температурна – около 0,4 °C.

Има достатъчно примери, при които е установена статистически значима корелация между активизирането на топлинното излъчване на земната повърхност в определени райони и повишаването на сеизмичната активност в тях. Следователно дистанционното изследване на Земята

в ИЧ диапазон може да служи за изучаване на сеизмоактивни райони и в близко бъдеще да даде принос в решаване на проблема за прогнозиране на сеизмични екокатастрофи.

Дистанционни аерокосмически изследвания в палеосеизмологията

Не всички активни разломни зони и не по цялото си протежение могат да пораждат земетресения. Натрупаната енергия може да се освобождава както във вид на мигновени импулси, т.е. земетресения, разделени от епохи на относително спокойствие, така и плавно или скокообразно, но с толкова слаби и чести скокове, че те да се възприемат като непрекъснато движение. Следователно един от основните въпроси на сеизмопрогнозирането се свежда до това, кои са активните разломи с импулсен режим на освобождаване на натрупаната енергия. Отговорът се състои в колкото елементарен на пръв поглед, толкова и доказал правилността си принцип – където е ставало силно земетресение, там пак ще стане сеизмична екокатастрофа. На този принцип се базира *палеосеизмологията* – раздел от сеизмологията, изучаващ къде и кога в миналото са ставали силни земетресения.

Палеосеизмологичните изследвания са особено ценни за райони, за които липсват или са недостатъчни историческите и археологичните данни за станалите сеизмични катастрофи. За ефективността на такива изследвания са необходими и благоприятни ландшафтно-климатични условия, гарантиращи доброто изразяване и съхраняване на остатъчните сеизмодеформации (палеосеизмодислокации) през вековете.

Днес палеосеизмологичните изследвания са нискоефективни, а често и невъзможни без използването на дистанционни аерокосмически технологии. Чрез аерокосмически снимки се търсят следи от древни сеизмични екокатастрофи, както и доказателства за повтарянето им. След дешифриране на аерофотоснимки и космически снимки са открити следи от силни земетресения,



Космическа снимка на японския град Натори: преди (вляво) и след (вдясно) земетресението от 11 март 2011 г., разтресло полуостров Осика

станали преди много векове в южните части на Сибир, в Средна Азия, в Индия, в Монголия и др. Оказва се, че трусове с различни интензивности са оформяли различни специфични деформации на релефа. По тях е възможно да се определят и честотите на повтаряне на земетресенията.

В редица случаи размерите на изследваната територия са толкова големи, че търсенето на палеосеизмодислокации е затруднено дори и при използване на аерофотоснимки. В тези случаи единствената възможност са космическите снимки.

Една особено благоприятна за изучаване на сеизмичността на базата на палеосеизмични данни с използване на аерокосмически методи е територията на Централна Азия. От една страна, липсват пълни статистически данни за станалите в далечно минало земетресения, а от друга, ландшафтно-климатичните условия са благоприятни и добре са съхранили палеосеизмодислокациите. Важна особеност на силните исторически земетресения в Централна Азия е еднообразието на остатъчните сеизмодеформации. Практически всички тези земетресения са съпроводени с образуване на повърхностни

разриви с дължини десетки и стотици километри, отличаващи се със специфични морфоложки признаци, което позволява надеждното им дешифриране. Ефективността от използването на аерокосмическите технологии се обуславя от голямата територия и трудната достъпност на района.

Безспорно е, че космическите снимки могат с успех да се използват за търсене и изучаване на палеосеизмодислокации. От своя страна, едромащабните аерофотоснимки допълват космическите снимки, защото позволяват по-детайлно да се изследват отделните палеосеизмодислокации. Съвместното използване на аероснимки и на космическите снимки, допълнени с информация от наземните изследвания, позволява получаването на пълна и обективна характеристика на палеосеизмодислокациите, което в крайна сметка е ценна база за прогнози.

Повече информация за възможностите на аерокосмическите технологии при изучаване на сеизмична активност може да намерите в книгата на автора „Природни бедствия и екологични катастрофи“, издание на Издателството на БАН „Проф. Марин Дринов“. ■