

**Warnen trotz möglichen Fehlalarms?
Erdbebenforschung auf der Suche nach neuen Verfahren der Kurzzeit-Prognose
Claudia-Veronika Meister**

In der Erdbebenforschung ist man der Meinung, dass das Problem der Langzeit-Vorhersage von Erdbeben im Prinzip gelöst ist. Ein Erdbeben aber kurzzeitig, das heißt einige Dutzend Stunden vor der Stoßwelle, vorherzusagen ist eine der bedeutendsten Herausforderungen der modernen Geophysik.

Vor etwa 20 Jahren wurde klar, dass die herkömmlichen Methoden der Erdbebenvorhersage nicht für die Kurzzeit-Prognose einsetzbar sind. Deshalb wurde massiv nach neuen Verfahren gesucht. Diese fand man insbesondere im Bereich der Radiophysik und der Satellitenbeobachtungen. Es zeigte sich, dass das Problem der Kurzzeit-Erdbebenvorhersage nur auf der Grundlage interdisziplinärer Forschung möglich sein wird - durch die Beobachtung elektrischer, magnetischer, akustischer, thermischer, geochemischer, biologischer und konventioneller seismischer Vorboten. In den letzten 15 Jahren fand man heraus, dass Erdbebenvorboten nicht nur in der Lithosphäre der Erde detektiert werden können, sondern auch in der Erdatmosphäre und, vormals kaum vorstellbar, sogar in der Ionosphäre.

Eine der ersten Übersichtsarbeiten über seismo-elektromagnetische Erscheinungen wurde von Gokhberg et al. (1988) verfasst. Liperovsky et al. schrieben 1992 ein erstes Werk über die Kopplung physikalischer Prozesse der Lithosphäre und Ionosphäre vor Erdbeben. Umfangreiche Analysen der mittleren Ionosphärenparameter und der Spektren der Variationen dieser Parameter während seismischer Aktivitäten wurden durchgeführt. Insbesondere wurden Amplituden und Phasen von Radiowellen in der D-Schicht der Erdatmosphäre, die Plasmafrequenzen sporadischer E-Schichten (Anmerkung 1) und der F-Schicht der Ionosphäre (Anmerkung 2) einige Stunden vor Erdbeben, aber auch generell elektromagnetische Störungen der oberen Ionosphäre, beobachtet. Auf den Ionogrammen der Radarstationen suchte man nach Verschmierungen der detektierten Signale. Diese Verschmierungen können durch Turbulenzen auf dem Weg des reflektierten Signals verursacht worden sein. Sie werden als F-Spread oder Es-Spread bezeichnet, wenn die Turbulenz in der F-Schicht oder in einer sporadischen E-Schicht, einer Es-Schicht, auftritt.

Gleichzeitig begann die Dateninterpretation. Die Bücher von Pulinets und Boyarchuk (2000) und Molchanov und Hayakawa (2008) geben einen guten Überblick über die gegenwärtig untersuchten atmosphärischen-ionosphärischen Phänomene einige Wochen vor einem Erdbeben bis einige Wochen nach dem seismischen Schock.

Aber obwohl bereits sehr viele Daten ausgewertet wurden kann bisher kein Wissenschaftler ein Erdbeben kurzfristig genau vorhersagen. Gegenwärtig werden die verschiedensten physikalischen Phänomene sorgsam untersucht, die Erdbeben - meist diejenigen mit Magnituden größer 5 - begleiten. Man versucht, die physikalischen Mechanismen der Phänomene vor und nach Erdbeben herauszufinden - und es ist geplant, die Forschungsergebnisse in Zukunft in der Erdbebenvorhersage

einzusetzen.

Analyse charakteristischer Ionosphärenparameter

Die bisherigen Analysen der charakteristischen Ionosphärenparameter zeigten, dass die Variationen der Parameter verschiedener Regionen der Erde eine sehr komplizierte Zeitabhängigkeit und räumliche Struktur besitzen. Die maximalen Erscheinungen werden nicht immer über den Epizentren beobachtet. Ja, sogar die Amplituden der Variationen nehmen nicht immer zu, wenn man sich zeitlich dem Erdbeben nähert (Pulinets und Boyarchuk 2004, Liu et al. 2006, Liperovsky et al. 2002, Singh et al. 2004). So scheinen manchmal die Resultate der Erdbebenforschung vollkommen kontrovers zu sein.

Zum Beispiel nahm man bereits zu Beginn der 1980er Jahre an, dass, entsprechend den damaligen Beobachtungen der Ionosphäre von Erdbebenregionen mit senkrechten Radarstationen, die kritische foF2-Frequenz (sie entspricht der maximalen Plasma-Frequenz der F2-Schicht, d.h. der oberen, vollständig ionisierten F-Schicht) genügend empfindlich auf Erdbebenvorboten reagiert (Gokhberg et al. 1983, 1984; Khakimov et al. 1989; Liperovsky et al. 1990). Die Resultate der sich anschließenden Untersuchungen der nächtlichen foF2-Messungen in Mittelasien und der Analysen der Messungen am Tage bevor einigen sehr starken Erdbeben (Ondoh 2000, Gaivoronskaya 2005, Korsunova and Hegai 2005) zeigten, dass der Wert der mittleren foF2-Frequenz etwa 2-3 Tage vor einem Schock in einem relativ großen Bereich der Ionosphäre von $\pm 10^\circ$ geographischer Breite und $\pm 10^\circ$ geographischer Länge während schwacher geomagnetischer Aktivität ansteigt. Andererseits wurde auch ein relatives Minimum des foF2-Wertes etwa einen Tag vor Erdbeben über deren Epizentren festgestellt. In einigen Fällen wurde wiederum überhaupt keine Variation der foF2-Frequenz vor dem Beben gefunden. Und, in den Arbeiten (Ondoh 2000, Silina et al. 2001, Rios et al. 2004, Singh et al. 2004, Hobara and Parrot 2005, Liu et al. 2006) kam man zu der Schlussfolgerung, dass der Wert von foF2 vor einigen sehr starken Erdbeben mit $M > 6$ sogar abnimmt. Diese Abnahme des Wertes betrug bis zu 25 %.

Trotzdem, auch diese Forschungen gehen voran. Während man, wie bereits erwähnt, anfangs nur experimentelle Daten auswertete, die nachts registriert worden waren - um Fehlinterpretationen zu vermeiden -, so ist man heute bereits dabei, auch die am Tage gewonnenen Daten zu bearbeiten (Liperovskaya et al. 2008). Die Sonnenaktivität (u.a. die Variation der Einstrahlung der Sonne infolge ihrer Rotation in ca. 27 Tagen um die eigene Achse, der Einfluss der Jahreszeiten und der 22-Jahres-Zyklus der Zahl der Sonnenflecken) sowie geomagnetische Aktivitäten können die Ionosphärenparameter sehr stark verändern. Es ist nicht einfach, die weitaus schwächeren Lithosphären-Ionosphären-Kopplungen seismischen Ursprungs vor dem Hintergrund der viel stärkeren solaren und geomagnetischen Einflüsse herauszuarbeiten. Oft muss man vor den Analysen der Ionosphärenparameter so viele Daten ausschließen - da ungewiss ist, ob ein Nicht-Erdbeben-Einfluss vorlag - dass keine exakte statistische Auswertung mehr möglich ist.

Auch die für die Datenanalyse zulässigen Reichweiten zwischen Erdbeben und Erdbebenstation werden immer grösser. In den letzten Jahren beschränkte man sich üblicherweise auf Abstände zwischen Erdbebenstation und Erdbebenzentrum unterhalb 500 km (Meister et al. 2002). 2009 wurden auf der EGS-Generalversammlung die ersten Resultate bzgl. der foF2-Frequenz vorgestellt, die faktisch eine Detektierung von Erdbeben mit Magnituden $M > 6.5$ über Entfernungen von

einigen zehntausenden von Kilometern von der Erdbebenstation, d.h. faktisch um den Erdball, beinhalten. Dabei wurden vor allem auch Daten der Station "Rom" untersucht, leider jedoch nur für die Jahre 1958 bis 1996. Die Datenanalyse erfasste die Zeiten von 50 Stunden vor einem Erdbeben bis 50 Stunden nach dem Erdbeben.

Modellierung der Generierung elektrischer Felder und der Infrarotstrahlung

In den letzten zwanzig Jahren wurden in vielen wissenschaftlichen Arbeiten von verschiedenen Wissenschaftlergruppen anomale Veränderungen der elektrischen Felder in der erdnahen Atmosphäre (z.B. in Gokhberg et al. 1988, Morgunov 1998, Vershinin et al. 1999, Pulinets et al. 2000, Mal'zev and Morgunov 2005, Sorokin et al. 2006, 2007) - und manchmal auch sehr seltene Leuchterscheinungen (z.B. in Papadopoulos 1999) - erwähnt.

Gewöhnlich wurden Anomalien des zeitlichen Verhaltens der senkrechten Komponente des quasi-statischen elektrischen Feldes der Erde untersucht, die im Zusammenhang mit Erdbeben auftraten, während der keine meteorologischen Erscheinungen (z.B. ein Gewitter) beobachtet wurden, die ähnliche Effekte hätten hervorrufen können. Man stellte fest, dass recht langanhaltende Anomalien des elektrischen Feldes und vertikaler elektrischer Ströme etwa einige Stunden - manchmal aber nur Dutzende von Minuten - vor einem Erdbeben in einem Abstand von Epizentrum kleiner als 200 km auftraten. Die ersten Resultate der Analysen weisen darauf hin, dass derartige langanhaltende Anomalien im allgemeinen nicht mit Leuchterscheinungen verbunden sind. Es wurde ausserdem festgestellt, dass die Intensitäten der beobachteten anomalen Variationen nicht direkt von den Parametern der Erdbeben abhängen (Rulenko 2000). In dieser Hinsicht ist man jedoch heute der Meinung, dass die Analyse der elektrischen Felder und elektrischen Ströme noch vollkommen unzureichend war und man noch genauere statistische Untersuchungen durchführen muss, wobei wesentlich mehr Erdbeben zu berücksichtigen sind als bisher.

Jedoch, auch wenn die elektrischen Felder, die durch seismische Aktivitäten angeregt werden, nicht stark genug sind, um sichtbares Licht zu erzeugen, so könnten sie doch kurzzeitig relativ starke Infrarotemissionen in einem Wellenlängenbereich anregen, der 1-2 Größenordnungen oberhalb der Wellen des sichtbaren Lichtes liegt. In solch einem Fall könnte man zum Beispiel Infrarotemissionen in der Atmosphäre der Erde als Erdbebenvorboten ansehen.

Unter deutscher Mitarbeit wurden seit 1996 im wesentlichen auch zwei theoretische Modelle entwickelt, die beschreiben, wie die zusätzlichen elektrischen Felder, die man vor Erdbeben im erdnahen Raum beobachtet, entstanden sein könnten. Das eine Modell geht davon aus, dass sich Infraschall, oder allgemein akustische Schwerewellen (acoustico-gravity waves) seismischen Ursprungs, bis in die ionosphärische E-Schicht ausbreitet und dort mit sporadischen Schichten wechselwirkt. Die sporadischen Schichten sind Einlagerungen von Meteoritenmaterial, die sich horizontal über 100 km erstrecken können. Es sind also Wolken von Plasma, die schwerer und dichter sind als ihre Umgebung. Durch die Wechselwirkung werden vor allem elektrische Felder parallel zum Erdmagnetfeld und horizontale elektrische Hall-Felder senkrecht zu Neutralgaswinden erzeugt. Die Hall-Felder können wiederum spezielle Wellenturbulenzen, die sogenannten Farley-Buneman-Wellen, anregen, die man anscheinend tatsächlich während des SESCAT-Experimentes (Sporadic E SCATter) vor 16 Jahren nachts auf Kreta registrierte (Liperovsky et al. 1997). In diesem ersten Modell der Generierung elektrischer Felder wurde jedoch bis heute - aus Man-

gel an Finanzierungsmöglichkeiten - der Einfluss der Gradienten von Dichte und Temperatur in den Randschichten der Plasmawolken auf die physikalischen Prozesse nicht untersucht. Diese Gradienten könnten weitere Plasmainstabilitäten anregen und die bisherigen Resultate bzgl. der elektrischen Felder variieren.

Andererseits wird seit 2004 in Russland, Japan und Deutschland ein nichtstationäres Modell der Generierung elektrischer Felder entwickelt. Dieses Modell zeigt, dass einige Tage vor starken Erdbeben mit $M > 5$ in der Atmosphäre oberhalb von tektonischen Bewegungen in der Lithosphäre der Erde pulsartig auftretende, lokale elektrische Felder mit Zeitskalen zwischen einer Minute und hundert Minuten auftreten könnten. Voraussetzung für diese Felder sind allein das Auftreten von Aerosolen in der Luft, eine schnellere Ionisationsgeschwindigkeit der Atmosphäre und ein aufwärtsgerichteter Luftstrom (Liperovsky et al. 2008, 2009). Die Aerosole könnten z.B. aus Radon bestehen, dass vor Erdbeben verstärkt aus dem Erdboden strömt und infolge seiner Radioaktivität auch die Ionisationsgeschwindigkeit erhöht. Man meint seit etwa fünf Jahren, dass einige Tage vor Erdbeben "mosaik-artig" auftretende, lokale elektrische Felder mit Intensitäten von $10^3 - 3 \times 10^3 \text{ Vm}^{-1}$ messbar sein müssten. Diese Felder könnten auch zusätzliche Spikes von bestimmten Nichtgleichgewichts-Emissionen von Kohlendioxyd CO_2 , Methan CH_4 (beide Gase strömen während Erdbeben verstärkt aus der Erdoberfläche aus), Ozon O_3 und Lachgas N_2O auslösen. Auf der EGU-Generalversammlung 2009 in Wien wurde vorgeschlagen, die Analyse von Infrarotspektren zur Bestimmung der atmosphärischen elektrischen Felder, und insbesondere auch als zusätzliches Verfahren der Erdbebenprognose, einzusetzen (Liperovsky et al. 2009). Aber auch bei diesem zweiten Modell der Erzeugung von elektrischen Feldern gibt es noch viel zu tun. Bisher wurde z.B. der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die elektrischen Felder noch nicht genügend erforscht.

VLF/LF-Radionetzwerke

Etwa vor 15 Jahren wurde auch vorgeschlagen, radiophysikalische Methoden zur Erdbebenvorhersage einzusetzen. Im Text wurde ja bereits darauf hingewiesen, dass sich vor Erdbeben die Ionisation des erdnahen Raumes verändert. Die Analyse der Ausbreitung von Radiowellen im extrem niederfrequenten Bereich von etwa 10 - 50 kHz wurde herangezogen, um kurzzeitige Elektronendichtemodifikationen in der unteren Ionosphäre und oberen Atmosphäre festzustellen (Gokhberg et al. 1989, Gufeld et al. 1992). Zu Beginn der radiophysikalischen Untersuchungen wurden nächtliche, relativ starke, "bucht-förmige" ("bay-like") Anomalien in den Phasen von Radiosignalen analysiert, die sich von Sendern bis zu Empfängern über mehr als 3000 km ausbreiteten. Heute kennt man zwei prinzipiell verschiedene Methoden, um Veränderungen in Radiosignalen festzustellen, die durch seismische Aktivitäten verursacht werden. Die erste Methode basiert auf dem Vergleich von Radiosignalen, die sich nachts in seismoaktiven Gebieten ausbreiten, mit denen, die durch nicht-seismische Gebiete geschickt werden. Die zweite Methode besteht in der Suche nach einem anomalen Verhalten der Amplituden der VLF/LF-Signale im Tagesverlauf, insbesondere bei Sonnenauf- und untergang (Terminator-Verfahren). Mit der zweiten Methode wurden in Japan bereits mehrere starke Erdbeben sehr erfolgreich vorhergesagt (Molchanov und Hayakawa 2008), die sich in Abständen von bis zu 1000 km von den VLF/LF-Stationen ereigneten.

Die erste Methode wurde nachträglich zur Analyse des L'Aquila-Erdbebens in Italien vom 6. April 2009 eingesetzt. Dieses Erdbeben hatte eine Stärke von $M_w=6.3$. Es wurden VLF-Signale des

sizilianischen Senders ITS (45,9 kHz) und des sardinischen Senders ICV (20,27 kHz), die sich durch das Erdbebengebiet ausbreiteten, mit Signalen der Sender NKR/Island (37,5 kHz) und GBS/Großbritannien (19,56 kHz) verglichen, die sich in einer erdbebenfreien Zone ausbreiteten. Alle vier Signale wurden in Graz (1000 km entfernt vom Erdbeben) und Moskau (in 3000 km Entfernung) empfangen. Sowohl in Graz als auch in Moskau stellte man fest, dass die Radiosignale, deren Weg durch die seismo-aktiven Regionen verlief, etwa 5-6 Tage vor dem Erdbeben bei L'Aquila gedämpft worden waren (Rozhnoi et al. 2009). Auch bei Anwendung des Terminator-Verfahrens zwischen Italien (Sender ITS und ICV) und Graz (Empfänger) wurden vom 30.3.09 bis zum 02.04.09 Signalanomalien festgestellt (Rozhnoi et al. 2009).

Die sehr lange seismische Aktivität vor dem eigentlichen Erdbeben (foreshock activity) von L'Aquila wurde von den Seismologen als schwacher Erdbebenschwarm interpretiert. Dadurch wurde die Vorhersage eines starken Erdbebens ausgeschlossen (Rozhnoi et al. 2009). Hätte man noch vor dem Beben gleichzeitig die VLF Radiosignale ausgewertet, man wäre vielleicht darauf gekommen, dass es sich doch um ein sehr starkes Erdbeben handeln muss.

Man sieht, in der modernen Erdbebenforschung gibt viele neue Ideen, Modelle, Verfahren, und sehr viele enthusiastisch arbeitende Wissenschaftler. Das Problem der Erdbebenvorhersage ist äußerst kompliziert. Die einzelnen, bereits existierenden theoretischen Modelle beschreiben immer nur einen Teil der realen Erdbeben. Deshalb wird es wohl kaum in absehbarer Zeit ein einzelnes Verfahren der Erdbebenprognose geben, mit dem man ein Erdbeben kurzzeitig genau vorher-sagen kann. Schaden kann man auch anrichten, wenn man ganze Städte aufgrund einer räumlich, zeitlich gesehen oder entsprechend der Stärke eines Bebens falschen Erdbebenvorhersage evakuiert. Fehlalarme sind gegenwärtig nicht ausgeschlossen. Man muss aber alles tun, um sie zu vermeiden. Dazu gehört, dass man, zusätzlich zu den konventionellen seismischen Methoden, verschiedenste weitere Methoden der Erdbebenprognose gleichzeitig einsetzt, bodengebundene und Satellitenmes-sungen kombiniert, physikalische und chemische Veränderungen der Atmosphäre und Ionosphäre beobachtet und eine schnelle Datenbearbeitung und -auswertung garantiert. Die Technische Uni-versität Darmstadt hat angeboten, im internationalen VLF/LF-Netzwerk "International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors" (INFREP) mitzuarbeiten und einen eigenen VLF/LF-Empfänger zu betreiben.

Claudia-Veronika Meister

Darmstadt, den 24.7.09

Anmerkung 1: Die E-Schicht ist die mittlere Ionosphärenschicht, die sich in einer Höhe zwischen 110 und 130 km ausbildet. Ionisation findet auf Grund weicher Röntgenstrahlung (Wellenlänge 1-10 nm) und ultravioletter Strahlung (zwischen 80 und 102,7 nm) an atomarem Sauerstoff (O) sowie Stickstoff- und Sauerstoffmolekülen (N₂, O₂) statt. Sie weist eine mittlere Elektronenkonzentration von etwa 100.000 je cm³ auf. Dies entspricht einer Ionisation von nur 0,1 % der vorhandenen Atome. Die sporadischen Schichten der E-Schicht werden durch zusätzliche Einlagerungen von Metallionen Fe⁺, Mg⁺, Al⁺, Ca⁺, K⁺ meteoritischen Ursprungs in die E-Schicht gebildet, die mittleren Ionenmassen sind damit 50mal größer als die Protonenmassen. Sporadische Schichten wurden in allen geographischen Breiten nachgewiesen und können auch übereinander liegen.

Anmerkung 2: Die F-Schicht ist mit 200 bis 400 km Höhe die höchstgelegene und am stärksten ion-

isierte Schicht der Ionosphäre. Sie wird durch extreme ultraviolette Strahlung (EUV, Wellenlänge 14 bis 80 nm) ionisiert, die auf atomaren Sauerstoff oder Stickstoff-Moleküle trifft. Sie weist eine breite Region maximaler Ionisation von bis zu einer Million freier Elektronen je cm^3 auf.

Literatur:

- Gaivoronskaya T.V., Ionospheric variations in seismo-active regions, *Fiz. Zemli*, 3, 56-60, 2005.
- Gokhberg M.B., Gershenson N.I., Gufeld I.L., Kustov A.V., Liperovsky V.A., Khusamiddinov S.S., On the possible effects of the influence of electric fields of seismic origin on the ionosphere, *Geomagn. Aeron.*, 24(2), 217-222, 1984.
- Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Pokhotelov O.A., Seismoelectromagnetic phenomena, Nauka, 1988.
- Gokhberg M.B., Pilipenko V.A., Pokhotelov O.A., On seismic precursors of earthquakes, *Izv. AN SSSR, Fiz. Zemli*, 10, 17-21, 1983.
- Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., Marenko V.F., Yampolshy V.S., Ponomarev E.A., Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 57, 64-67, 1989.
- Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., Tyumensev S.N., Sherstuk S.V., Yampolsky V.S., Radiowave disturbances in period to Rudber and Rachinsk earthquakes, *Phys. Solid Earth*, 28(3), 267-270, 1992.
- Hobara Y., Parrot M., Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 67, 677-685, 2005.
- Kharimov F.K., Liperovsky V.A., Shalimov S.L., Alimov O.A., Liperovskaya R.K., Roubtsov L.N., On disturbances in the ionosphere before some earthquakes in Tadshikistan in 1987, *Dokl. AN Tadj. SSR*, 32 (12), 824-828, 1989.
- Korsunova L.P., Hegai V.V., Seismo-ionospheric effects of strong core earthquakes in the Pacific, *Geomag. Aeron.*, 45(5), 665-671, 2000.
- Liperovskaya E.V., Biagi P.-F., Meister C.-V., Rodkin M.V., foF2 seismo-ionospheric effect analysis: actual data and numerical simulations, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 2008, 1387-1393.
- Liperovsky V.A., Alimov O.A., Shalimov S.L., Gokhberg M.B., Liperovskaya R.K., Saidshoev A., Investigation of the F-layer of the ionosphere before earthquakes, *Fiz. Zemli*, 12, 77-86, 1990.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Bogdanov V.V., On the generation of electric field and infrared radiation in aerosol clouds due to radon emanation in the atmosphere before earthquakes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 2008, 1199-1205.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Bogdanov V.V., Liperovskaya E.V., Hoffmann D.H.H., Model of generation of small-scale non-stationary current systems in the atmosphere connected to earthquakes, *Geophys. Res. Abstr.* 11, 2009, EGU2009-8682-2.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Popov K.V., Liperovskaya E.V., Molchanov O.A., Silina A.S., On the time scales of some seismo-ionospheric effects. *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling*, eds. Hayakawa M and Molchanov O.A., Tokyo, TERRAPUB, 325-327, 2002.
- Liperovsky V.A., Meister C.-V., Schlegel K., Haldoupis Ch., Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E-layers caused by strong acoustic impulses, *Ann. Geophysicae*, 15, 1997, 767-773.

- Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Shalimov S.L., Ionospheric presursors of earthquakes, Nauka, 1992.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S., A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly, *J. Geophys. res.*, 111, A05304, doi:10.1029/2005JA011333.2006, 2006.
- Mal'zev S.A., Morgunov V.A., On the physical model of disturbances of the electric field of lithospheric nature in the atmosphere and EMI, *Fizika Zemli*, 9, 65-73, 2005.
- Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Molchanov O.A., Pokhotelov O.A., Senchenkov S.A., Alimov O.A., To the question of spatial scales of seismoionospheric effects, in: *Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, Terra Sci.-Pub. Co., Tokyo, 2002, 329-331.
- Molchanov O., Hayakawa M., *Seismo-electromagnetics and related phenomena: History and latest results*, TERRAPUB, Tokyo, pp. 190, 2008.
- Morgunov V.A., Electrical phenomena before the Shikotan earthquake and its aftershocks, *Dokl. RAN*, 3359 (1), 102-105, 1998.
- Ondoh T., Seismo-ionospheric phenomena, *Adv. Space Res.*, 26(8), 1267-1272, 2000.
- Papadopoulos G.A., Luminous and fiery phenomena associated with earthquakes in the East Mediterranean, atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes, ed. Hayakawa M., TERRABUB, 559-575, 1999.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., *Ionospheric precursors of earthquakes*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M., Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling, *Adv. Space Res.*, 26(8), 1209-1218, 2000.
- Rios V.H., Kim V.P., Hegai V.V., Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977, *Adv. Space Res.*, 33, 323-327, 2004.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Biagi P.-F., Hayakawa M., Schwingenschuh K., Boudjada M., Parrot M., Variations of VLF/LF signals observed on ground and satellite during seismic activity in Japan region in May-June 2008, EGU General Assembly, Vienna, 23.4.09, EGU2009-1323, paper in preparation.
- Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.-F., Maggipinto T., Castellana L., VLF signal precursors of L'Aquila earthquake, EGU General Assembly, Vienna, 23.4.09, paper in preparation.
- Rulenko O.P., Operative precursors of earthquakes in the electricity of the near-Earth atmosphere, *Vulcanology and Seismology*, 4, 57-68, 2000.
- Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V., Ionospheric phenomena before strong earthquakes, *Nat. hazards Earth Syst. Sci.*, 1, 113-118, 2001.
- Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., Reddy B.M., Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India, *Phys. Chem. Earth*, 29, 537-550, 2004.
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Chmyrev V.M., Hayakawa M., DC electric field amplification in the mid-latitude ionosphere over seismically active faults, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 447-453, 2006.
- Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M., A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 155-163, 2007.

Vershinin E.F., Buzevitch A.V., Yumoto K., Saito K., Tanaka Y., Correlation of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region, Atmospheric and Ionospheric Phenomena Associated with Earthquakes, ed. Hayakawa M., TERRAPUB, Tokyo, 513-517, 1999.