

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**С. А. Зимина, М. И. Зимин**

2554620 ONTARIO LTD., г. Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru

Аннотация: рассматривается системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. Оценивается влияние сейсмических событий на окружающую среду. Приводятся примеры расчёта.

Ключевые слова: системный анализ, очаг землетрясений, мониторинг, сейсмическое событие, риск.

Для цитирования: Зимина С. А., Зимин М. И. Применение системного анализа состояния очага землетрясений. *Успехи кибернетики*. 2021;2(1):49–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5.

SYSTEMS ANALYSIS OF EARTHQUAKE SOURCE STATUS AND ITS APPLICATIONS**S. A. Zimina, Mikhail I. Zimin**

2554620 ONTARIO LTD., Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru

Abstract: The study proposes systems analysis of earthquake source status and its applications. The impact of seismic events on the environment is estimated. The analysis examples are included.

Keywords: systems analysis, earthquake source, monitoring, seismic event, risk.

Cite this article: Zimina S. A., Zimin M. I. Systems Analysis of Earthquake Source Status and Its Applications. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(1):49–68. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-5.

Введение

Важным вопросом обеспечения безопасности в регионах, подверженных землетрясениям, является эффективное применение системного анализа результатов мониторинга очага землетрясений.

Землетрясения оказывают весьма разнообразные воздействия на окружающую среду [1–30]. В связи с этим мониторинг состояния очага землетрясений представляет значительный научно-практический интерес. Так как предвестники подземных толчков весьма разнообразны [16], то системный анализ совокупности данных о них выглядит перспективным направлением исследований. Кроме того, важно также использование его результатов при прогнозировании связанных с ним опасных явлений, таких как ухудшение состояния людей и животных, склоновых процессов и так далее [31].

Использование результатов мониторинга очага землетрясений при оценке состояния селевого очага

Технология прогнозирования селевой опасности с учетом результатов мониторинга очага землетрясений заключается в следующем. Для базовой модели сначала вычисляются величины [32]:

$$p_h = \begin{cases} 1 & \text{при } h < 30 \text{ м} \\ e^{0,023(h-30)} & \text{при } h \geq 30 \text{ м} \end{cases}, \quad (1)$$

где p_h — величина, учитывающая влияние толщины морены над погребенным льдом на селевую опасность (эта величина со временем может меняться), h — толщина морены над погребенным льдом, м;

$$p_{t10} = \begin{cases} \frac{2}{\pi p_h} \arctg(0,00012 t_{10}^{3,76}) & \text{при } t_{10} \geq 0 \\ -\frac{2}{\pi} \arctg[0,00012(-t_{10})^{3,76}] & \text{при } t_{10} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где p_{t10} — величина, учитывающая влияние средней температуры воздуха за последние 10 дней на возможность схода селя, t_{10} — средняя температура воздуха за последние 10 дней, °C;

$$p_t = \begin{cases} p_{t10} & \text{при } p_{t10} \leq \frac{2}{\pi} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}) \\ \frac{2}{\pi p_h} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}) & \text{при} \\ p_{t10} > \frac{2}{\pi} \arctg(3,2 \cdot 10^{-10} t^{3,7}), \end{cases} \quad (3)$$

где p_t — величина, учитывающая влияние суммы среднесуточных температур воздуха с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C на возможность схода селя, t — сумма среднесуточных температур с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C ;

$$p_q = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \text{ и } q < 52 \text{ мм} \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,000686q^{2,46}) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s \geq 0^\circ\text{C}) \text{ или } q \geq 52 \text{ мм}, \end{cases} \quad (4)$$

где p_q — величина, учитывающая влияние суммы жидких осадков за последние сутки на возможность схода селя, t_s — среднесуточная температура воздуха, $^\circ\text{C}$, q — сумма жидких осадков за последние сутки, мм;

$$p_{oq} = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \text{ и } q < 52 \text{ мм} \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,032o) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ и } t_s \geq 0^\circ\text{C}) \text{ или } q \geq 52 \text{ мм}, \end{cases} \quad (5)$$

где p_{oq} — величина, учитывающая влияние средней интенсивности осадков за последние три часа на возможность схода селя, o — средняя интенсивность жидких осадков за последние три часа, мм/час;

$$p_m = \begin{cases} 0 & \text{при } (t_{10} < 0^\circ\text{C} \text{ или } t_s < 0^\circ\text{C}) \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,00012q_m^{1,9}) & \text{при } (t_{10} \geq 0^\circ\text{C} \text{ и } t_s \geq 0^\circ\text{C}), \end{cases} \quad (6)$$

где p_m — величина, учитывающая влияние суммы осадков за предшествующий месяц на возможность схода селя, q_m — сумма жидких осадков за предшествующий месяц, мм; если $p_t < 0,11$, то значение p_m , полученное по формуле (6), уменьшается в 3,6 раза;

$$p_{bio} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctg(0,06d) & \text{при } (p_q < 0,79 \text{ и } p_t < 0,79 \text{ и } p_m < 0,79) \\ \frac{2}{\pi} \arctg(0,85d) & \text{при } (p_q < 0,79 \text{ или } p_t < 0,79 \text{ или } p_m < 0,79), \end{cases} \quad (7)$$

где p_{bio} — величина, учитывающая влияние наличия аномального поведения животных на возможность схода селя, d — степень выраженности биологических предвестников, которая определяется так же, как при мониторинге очага землетрясений;

$$p_e = \begin{cases} 0 & \text{при } t_s < 2,7^\circ\text{C} \\ \frac{2q_e}{\pi} \arctg(0,000103I^{5,3}) & \text{при } t_s \geq 2,7^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (8)$$

где p_e — величина, учитывающая влияние землетрясения на возможность схода селя, q_e — вероятность возникновения землетрясения в последующие сутки, I — интенсивность землетрясения по шкале MSK-81.

После этого определяются параметры [32]:

$$p_q^* = p_q^{1-0,22p_{oq}-0,07p_e-0,04p_{bio}-0,16p_t-0,07p_{t10}-0,06p_m}, \quad (9)$$

где p_q^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за последние сутки с учетом значений p_{oq} , p_e , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_{oq}^* = p_{oq}^{1-0,13p_t-0,05p_e-0,06p_{bio}-0,16p_q-0,04p_{t10}-0,07p_m}, \quad (10)$$

где p_{oq}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по средней интенсивности жидких осадков за последние 3 часа с учетом значений p_q , p_e , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_e^* = p_e^{1-0,07p_t-0,01p_{oq}-0,19p_{bio}-0,02p_q-0,02p_{t10}-0,04p_m}, \quad (11)$$

где p_e^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по возможной сейсмической нагрузке с учетом значений p_q , p_t , p_m , p_{bio} , p_t , p_{t10} ;

$$p_t^* = p_t^{1-0,12p_q-0,15p_m-0,03p_{bio}-0,09p_{oq}-0,04p_e-0,08p_{t10}}, \quad (12)$$

где p_t^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме среднесуточных температур воздуха с момента перехода среднесуточной температурой воздуха через 0 °C с учетом значений $p_q, p_e, p_m, p_{bio}, p_{oq}, p_{t10}$;

$$p_{bio}^* = p_{bio}^{1-0,21p_e-0,07p_q-0,04p_m-0,03p_i-0,08p_t-0,02p_{t10}}, \quad (13)$$

где p_{bio}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по наличию аномального поведения животных с учетом значений $p_q, p_e, p_m, p_t, p_i, p_{t10}$;

$$p_m^* = p_m^{1-0,11p_q-0,1p_{oq}-0,12p_e-0,04p_{bio}-0,07p_t-0,01p_{t10}}, \quad (14)$$

где p_m^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за месяц с учетом значений $p_q, p_e, p_i, p_{bio}, p_t, p_{t10}$;

$$p_{t10}^* = p_m^{1-0,1p_q-0,04p_{oq}-0,02p_e-0,09p_{bio}-0,11p_t-0,03p_m}, \quad (15)$$

где p_{t10}^* — степень принадлежности ситуации к селеопасной по сумме жидких осадков за месяц с учетом значений $p_q, p_e, p_{oq}, p_{bio}, p_t, p_m$.

Степень принадлежности ситуации к селеопасной рассчитывается по формуле [32]:

$$p_s = [0,79 + 0,21 \frac{2}{\pi} \arctg(1,22d + 0,9q)] \times \\ \times [1 - (1 - p_{bio}^*) \cdot (1 - p_e^*) \cdot (1 - p_{oq}^*) \cdot (1 - p_m^*) \times \\ \times (1 - p_q^*) \cdot (1 - p_t^*) \cdot (1 - p_{t10}^*)], \quad (16)$$

где p_s — степень принадлежности ситуации к селеопасной.

Далее вычисляется код селевой опасности:

$$j = \begin{cases} 0 & \text{при } p_s < 0,17 \\ 1 & \text{при } 0,17 \leq p_s < 0,9 \\ 2 & \text{при } 0,6 \leq p_s < 0,6 \\ 3 & \text{при } 0,9 \leq p_s < 0,95 \\ 4 & \text{при } p_s \geq 0,95 \end{cases} \quad (17)$$

где j — код селевой опасности.

Степени выраженности биологических предвестников землетрясений определяются так же, как и при мониторинге очага землетрясений.

В табл. 1 приведены прогнозы селей на последующие сутки в зависимости от j .

Таблица 1

Прогнозы селей на последующие сутки в зависимости от j

j	Прогноз на последующие сутки
0	Сход селей не ожидается
1	Возможен сход селей малого объема (до 10 тыс. м ³)
2	Ожидается сход селей среднего объема (10–100 тыс. м ³)
3	Ожидается сход крупного селя (100 тыс. – 1 млн м ³)
4	Ожидается сход очень крупного селя (1–10 млн м ³)
5	Ожидается сход гигантского селя (> 10 млн м ³)

Зоны зарождения и транзита селей, для которых создана эта методика, показаны на рис. 1 [28]. Они принадлежат к расположенному в Приэльбрусье (Северный Кавказ) Тырныаузскому селеопасному району, который является центром одноименного горно-промышленного района, имеет большие перспективы экономического развития на базе месторождений редких и цветных металлов, гидроэнергетических ресурсов, строительных материалов, каменного угля [28]. Ввиду отсутствия свободной для застройки площади (г. Тырныауз находится в Баксанском ущелье) значительная часть предприятий и жилых домов возведена на селеопасном участке города — конусах выноса рек Герхожан-Су и Камык-Су [28].

В бассейне реки Герхожан-Су есть очаги образования и подпитки селей [28]. В субнивальном поясе расположены современные ледниковые морены, с которыми связаны основные очаги селеобразования [28]. К альпийскому, субальпийскому и горно-лесному поясам приурочены очаги подпитки селей эрозионного, обвально-осыпного и оползневого типов [28]. Максимальные абсолютные отметки бассейна превышают 4000 м, высота фирновой линии на ледниках — 3600 м [28].

Трещины отдельных пород, слагающих склоны в гляциально-нивальном поясе, направлены к руслам рек Каярты-Су и Сакашили-Су, вследствие чего здесь сходит большое количество грунтовых лавин, транспортирующих весной мокрый снег и рыхлообломочный материал в водостоки [28].

Запасы рыхлого материала в бассейне реки, образовавшиеся в результате выветривания двуслюдяных гранитов, кварцево-хлористо-серицитовых сланцев магматитов, алевролитов и песчаников, превышают 100 млн м³ [28].

Толщина ледника колеблется от 70 до 75 м, толщина морены изменяется от 40 до 50 м, толщина льда под мореной равна 4–30 м [28].

При расчетах в реальном времени оправдываемость прогнозов составила 38 %. Ее сравнительно низкая величина объясняется высоким заданным уровнем безопасности.

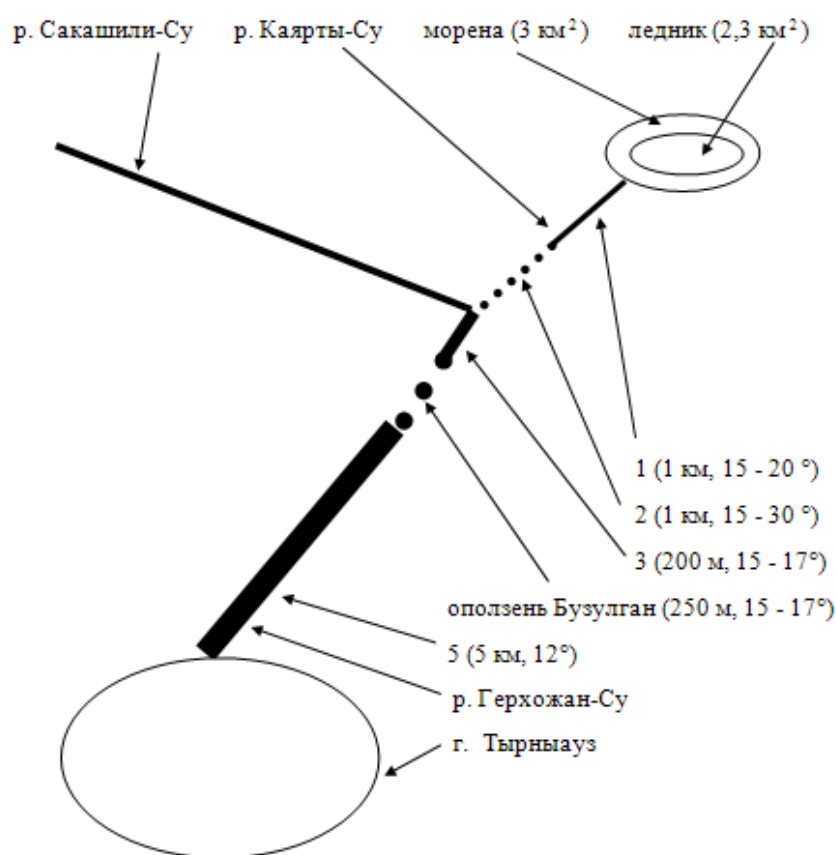


Рис. 1. Расчетная схема зон зарождения и транзита селей около г. Тырнауза

Нельзя исключить ситуацию, когда исходных данных для построения математических моделей зарождения и движения селей недостаточно. В этом случае можно использовать приведенные выше прогностические зависимости в качестве опорных, вводя поправочные параметры.

Например, как показывает математическое моделирование, сход селя при угле склона меньше либо равном 1,7° нереален. Следовательно, для подобных участков даже при высоком таянии погребенных льдов и сильных осадках селевая опасность отсутствует.

Объем селя пересчитывается по формуле:

$$V_{sc} = V_{sg} \left(\frac{V_{Lrc}}{V_{Lrg}} + \frac{V_{ic}}{V_{ig}} \right), \quad (18)$$

где V_{sc} — объем селя, ожидаемого в заданном очаге, V_{sg} — объем селя, ожидаемого в очаге реки

Герхожан-Су при аналогичных условиях, V_{Lrc} — объем рыхлого материала, имеющего размер частиц не более 20 мм, в заданном очаге, V_{Lrg} — объем рыхлого материала, имеющего размер частиц не более 20 мм, в селевом очаге реки Герхожан-Су, V_{ic} — объем погребенного льда в заданном очаге, V_{ig} — объем погребенного льда в селевом очаге Герхожан-Су в 2000 году ($38 \cdot 10^6 \text{ м}^3$).

Если отсутствуют погребенные льды, то сумма среднесуточных температур с момента перехода среднесуточной температурой через 0°C и средняя температура за последние 10 дней не принимаются во внимание. В этом случае не учитывается также влияние сейсмической нагрузки.

В качестве примера можно привести оценку селевой опасности по данным на 17.07.2000 в районе г. Тырнауз при объеме рыхлого материала в очаге $5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. В этом случае по прогнозу ожидается сход селей среднего объема (10–100 тыс. кубометров), что выглядит правдоподобным, так как при аналогичных условиях имел место сход селя в районе г. Тырнауз объемом несколько сотен тысяч кубометров, но, поскольку объем рыхлой породы в рассматриваемом очаге на порядок меньше, то и объем возникшего в нем селя должен быть существенно меньше.

Другим примером является расчет по предыдущим исходным данным, но при объеме рыхлого материала в очаге 50000 м^3 . В этом случае ожидается только сел малюго объема, что также логично.

Описанный подход позволяет осуществлять оперативное прогнозирование селей в условиях сильной неопределенности. Это особенно важно в тех случаях, когда сели в каком-либо районе сходят редко, оценка их объема затруднена, но они все-таки теоретически возможны. Кроме того, есть возможность учета сейсмической нагрузки, что может быть использовано не только для оперативного прогноза селевой опасности, но и для долгосрочных оценок.

Зависимость интенсивности землетрясения в баллах по шкале MSK-64 от расстояния от эпицентра имеет вид [29]:

$$I = 1,5M - 3,5 \lg \left(\sqrt{s^2 + h^2} \right) + 3, \quad (19)$$

где I — расчетная интенсивность землетрясения, баллы по шкале MSK-64, — магнитуда землетрясения, s — расстояние до эпицентра, км, h — глубина очага, км.

Поскольку описания интенсивности землетрясений по шкалам MSK-64 и MSK-81 практически не отличаются, то формула (19) вполне пригодна и для вычисления интенсивности подземных толчков в заданном пункте и по шкале MSK-81.

Использование результатов мониторинга очага землетрясений и зоны зарождения селей при оценке их влияния на состояние здоровья

Математическое моделирование распространения стресса, обусловленного процессами в очагах землетрясений и селей, выполняется по аналогии с тем, как это уже было осуществлено для анализа неблагоприятного влияния сейсмических процессов на людей [33]. Тем не менее принимается во внимание то, что, хотя процессы в селевых очагах и не оказывают влияния на людей, они способны воздействовать на животных, так как те более чувствительны. Это подтверждается опубликованными данными [1, 6, 11, 16], показывающими, что выраженное болезненное состояние людей перед подземными толчками фиксируется редко в отличие от аномального поведения животных и птиц.

Учитывается также возможное взаимное усиление негативных эффектов, вызванных разными факторами, что в [33] не рассмотрено.

О реакции людей, животных и птиц на землетрясение известна обобщенная информация, приведенная в табл. 2 [1].

Эти данные говорят о том, что реакция животных на подземные толчки интенсивностью I баллов ориентировочно соответствует реакции людей на сейсмическое событие, имеющее интенсивность $I + 1$ баллов. Действительно, большинство людей испугано и выбегает из помещений при 7 баллах, в то время как животные покидают их при 6 баллах. Животные становятся беспокойными, если возникает пятибалльное сейсмическое событие, а многие люди — если оно шестибалльное.

Если следовать табл. 2 и [33], то во время сейсмических событий есть 6 уровней паники. Соответственно, в первом приближении можно предположить, что их общее вредное влияние на здоровье также разделяется на 6 уровней. С использованием понятия функции принадлежности теории нечетких множеств эти уровни можно представить в виде, иллюстрируемом табл. 3.

Принятое соответствие уровней неблагоприятного влияния землетрясения на людей и животных и уровней панического состояния дано в табл. 4.

Таблица 2

Реакция людей, животных и птиц на землетрясение

I	Реакция животных и птиц	Реакция людей
5	Становятся беспокойными	Многие спящие люди просыпаются. Некоторые выбегают из помещений
6	Выбегают из помещений	Многие люди испуганы и выбегают из помещений
7	–	Большинство людей испугано. Они выбегают из помещений
8	–	Всеобщий испуг; некоторые люди находятся в паническом состоянии
9	–	Всеобщая паника

Таблица 3

Зависимость уровня неблагоприятного влияния землетрясения на здоровье от степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору

Уровень неблагоприятного влияния землетрясения на здоровье	Степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору (p)
Незначительный	$p < 0,1$
Низкий	$0,1 \leq p < 0,3$
Требующий предосторожностей	$0,3 \leq p < 0,5$
Повышенный	$0,5 \leq p < 0,7$
Высокий	$0,7 \leq p < 0,9$
Серьезный	$p \geq 0,9$

Таблица 4

Зависимость уровня неблагоприятного влияния землетрясения на людей от степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору

Уровень неблагоприятного влияния землетрясения на людей	Уровень панического состояния
Незначительный	Паническое состояние отсутствует
Низкий	Многие спящие люди просыпаются. Некоторые выбегают из помещений
Требующий предосторожностей	Многие люди испуганы и выбегают из помещений
Повышенный	Большинство людей испугано. Они выбегают из помещений
Высокий	Всеобщий испуг; некоторые люди находятся в паническом состоянии
Серьезный	Всеобщая паника

По аналогии с [33] используются уровни опасности, показанные в табл. 5. Они позволяют осуществить достаточно четкое разделение профилактических мероприятий.

Вредное воздействие процессов в очаге землетрясения на людей описано несколько подробнее, чем его негативное влияние на животных и птиц. Поэтому сначала была выведена формула для оценки их действия на организм человека.

Рассматриваются 3 источника вредного влияния сейсмических процессов на живые организмы.

Прежде всего, это собственно землетрясение. Действительно, в необычной и, вполне возможно, опасной обстановке стресс у большинства людей и животных неизбежен.

Таблица 5

Кодирование уровня вредного влияния геодинамического процесса на состояние здоровья

Уровень вредного влияния геодинамического процесса на состояние здоровья	Код уровня	Величина функции принадлежности (р) геодинамического процесса к вредному фактору
Незначительный	0	$p < 0,1$
Низкий	1	$0,1 \leq p < 0,3$
Требующий предосторожности	2	$0,3 \leq p < 0,5$
Повышенный	3	$0,5 \leq p < 0,7$
Высокий	4	$0,7 \leq p < 0,9$
Серьезный	5	$p \geq 0,9$

В [9] описан инфразвуковой подземный шум, связанный с сейсмическими процессами. Инфразвук относится к вредному воздействию [34]. Этим явлением можно объяснить биологические предвестники подземных толчков.

Кроме того, сейсмическая нагрузка может вызывать инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций, не возникающие при других видах нагружения. Хотя мощность инфразвука в данном случае невелика, его воздействие из-за близкого до людей расстояния, по-видимому, все-таки может быть сопоставимо с влиянием инфразвука от очага землетрясения, находящегося в сотнях километрах от них.

Конструирование формулы для расчета уровня вредного влияния процессов в очаге землетрясений на организм человека выполняется на основе следующих положений.

Прежде всего, необходимо отметить, что степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору изменяется от 0 до 1. Тогда и область значений функции, используемой для расчета, должна принадлежать интервалу $[0; 1]$. При этом аргумент должен быть неотрицательным. В качестве подобных функций были отобраны:

$$p = \frac{2}{\pi} \arctg[f(x)]$$

и

$$p = 1 - a^{-f(x)},$$

где $f(x)$ — некоторая функция, область значений которой принадлежит интервалу $[0; \infty]$, — неотрицательное число.

Оптимальная зависимость $f(x)$ выбиралась из следующих функций:

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i \varphi_i(x),$$

где α_i — i -ый коэффициент разложения, $\varphi_i(i)$ — полином Чебышёва степени i ,

$$a \log_b x,$$

где a и b — коэффициенты,

$$a^{bx},$$

где a и b — коэффициенты,

$$ax^{x^b},$$

где a и b — коэффициенты,

$$th(ax^b),$$

где a и b — коэффициенты.

В качестве независимой переменной используются, в частности, значения $c \cdot I$, где c — коэффициент, оптимальное значение которого надо подобрать, I — интенсивность землетрясения в баллах по шкале MSK-81 в том месте, где находится человек.

Для поиска оптимальной функциональной зависимости и ее коэффициентов применяется простейший случайный поиск. Используются два критерия:

1. Вычисляемые степени принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору должны соответствовать уровню панического состояния для землетрясения любой балльности, заданной с точностью до одного балла.

2. Сумма квадратов отклонений степеней принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору от середин интервалов их значений должна быть минимальной.

Исходя из указанных критериев была получена следующая зависимость, учитывающая непосредственное влияние сейсмических колебаний грунта на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору:

$$p_{sh} = \frac{2}{\pi} \arctg(k_{sh}), \quad (20)$$

где p_{sh} — степень принадлежности сейсмического процесса к вредному для человека фактору, учитывающая влияние собственно землетрясения,

$$k_{sh} = \begin{cases} 0, & \text{при } I < 5 \\ 0,40 \left(\frac{I}{5,0}\right)^{\left(\frac{I}{5,0}\right)^{3,0}}, & \text{при } I \geq 5 \end{cases}. \quad (21)$$

При восьмибалльном землетрясении имеет место всеобщий испуг, чему соответствует $0,7 \leq p < 0,9$, но некоторые люди находятся в паническом состоянии [1], для которого $p > 0,9$. Этот факт в ряде случаев может быть объяснен тем, что возникает сочетание испуга от собственно подземных толчков с испугом, связанным с инфразвуковым подземным шумом в очаге землетрясения и инфразвуковыми колебаниями оборудования и несущих элементов конструкций. Вполне допустимо также, что испуг от собственно сейсмического события усиливает испуг, обусловленный этими источниками инфразвука.

С помощью простейшего случайного поиска была выбрана следующая зависимость степени принадлежности сейсмического процесса к вредному для здоровья людей явлению p_h от совместного влияния всех вредных факторов в виде:

$$p_h = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sh} + \lambda_2 (k_{eh} + k_{fh})^{1+\lambda_1 k_{sh}} \right], \quad (22)$$

где λ_1 и λ_2 — неизвестные коэффициенты.

Согласно теоретическим расчетам [35] биологические предвестники землетрясений могут проявляться на расстоянии до 320 км от эпицентра. Из приведенных в [11, 16] их описаний следует, что они наблюдались на дальности до 250 км. Поэтому величина 320 км выглядит вполне достоверной.

Естественно, не каждое сейсмическое событие в состоянии сгенерировать сколько-нибудь опасные инфразвуковые колебания. Согласно [1] четырехбалльное землетрясение ощущается многими людьми в зданиях, а трехбалльное — только некоторыми. Вполне можно предположить, что только землетрясение интенсивностью 4 балла и выше может производить некоторое воздействие на человека. Тогда в принципе можно сказать, что и инфразвуковой подземный шум достаточно интенсивен начиная с 4-х баллов. Поэтому при выводе соответствующей зависимости требовалось, чтобы инфразвуковой подземный шум создавал не более чем низкое воздействие на людей, дальность воздействия не превышала 320 км и интенсивность подземных толчков была не менее 4-х баллов по шкале MSK-81.

Предполагается, что аналогично влияют и инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций. Действительно инфразвуковой подземный шум при землетрясении может и отсутствовать. Тогда резонно допустить, что есть еще один источник инфразвука с тем же уровнем вредного воздействия.

Исходя из приведенных положений, выводятся формулы:

$$k_{eh} = \begin{cases} 0, & \text{при } l \geq 320 \text{ км, или } I_e < 4 \\ 1, & \text{при } l < 320 \text{ км и } I_e \geq 4, \end{cases} \quad (23)$$

где l — расстояние от человека до эпицентра землетрясения, км; I — интенсивность землетрясения в эпицентре, k_{eh} — коэффициент, учитывающий влияние инфразвукового подземного шума на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору,

$$k_{fh} = \begin{cases} 0, \text{ если инфразвуковые колебания оборудования} \\ \text{и несущих элементов конструкций не} \\ \text{возникают во время землетрясения или} \\ \text{интенсивность подземных толчков там, где} \\ \text{находится человек составляет менее} \\ \text{4-х баллов по шкале MSK-81;} \\ 1, \text{ если инфразвуковые колебания оборудования} \\ \text{и несущих элементов конструкций} \\ \text{возникают во время землетрясения и} \\ \text{интенсивность подземных толчков там, где} \\ \text{находится человек составляет не менее} \\ \text{4-х баллов по шкале MSK-81,} \end{cases} \quad (24)$$

где k_{fh} — коэффициент, учитывающий влияние инфразвукового подземного шума на степень принадлежности сейсмического процесса к вредному фактору.

При этом предполагается, что инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций воздействуют только на людей в тех зданиях, где они возникают, поскольку размеры очага землетрясений и подавляющего большинства сооружений несопоставимы.

Так как люди слабо ощущают процессы подготовки землетрясения (биологические предвестники сейсмических событий касаются, в основном, животных), то уровень вредного влияния инфразвукового подземного шума на организм человека в случае отсутствия других вредных факторов предполагается низким. Это также подтверждается данными по Ашхабадскому землетрясению. Судя по его описанию и оценкам, приведенным в [3], есть серьезные основания утверждать, что инфразвуковой подземный шум, возникающий в очаге землетрясения, имеет низкий уровень неблагоприятного влияния на организм человека.

В этом случае средняя величина функции принадлежности (p) геодинамического процесса к вредному фактору равна 0,25 и для определения λ_2 выводится уравнение:

$$0,25 = \frac{2}{\pi} \arctg(\lambda_2),$$

откуда $\lambda_2 = 0,4142$.

Исходя из того, что при воздействии всех неблагоприятных факторов при восьмибалльном землетрясении находится в середине интервала $[0,9; 1]$, то есть равно 0,95, $\lambda_1 = 1,3086$.

Таким образом, степень принадлежности процессов в очаге землетрясений к вредному для людей фактору можно оценить по формуле:

$$p_h = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sh} + 0,4142 \cdot (k_{eh} + k_{fh})^{1+1,3086k_{sh}} \right]. \quad (25)$$

Степень принадлежности процессов в очаге землетрясений к вредному для животных фактору вычисляется по формуле (8), однако с учетом того, что, как было показано выше, реакция животных на подземные толчки интенсивностью I баллов ориентировочно соответствует реакции людей на сейсмическое событие, имеющее интенсивность $I + 1$ баллов, и процессы в селевых очагах также следует учитывать в данном случае, то есть:

$$p_a = \frac{2}{\pi} \arctg \left[k_{sa} + 0,4142 \cdot (k_{ea} + k_{fa})^{1+1,3086k_{sa}} \right], \quad (26)$$

где

$$k_{fa} = \begin{cases} 0, & \text{если инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций не возникают во время землетрясения, или интенсивность подземных толчков там, где находится животное составляет менее 3-х баллов по шкале MSK-81 и сход селей ближе 320 км не ожидается.} \\ 1, & \text{если инфразвуковые колебания оборудования и несущих элементов конструкций возникают во время землетрясения и интенсивность подземных толчков там, где находится животное составляет не менее 3-х баллов по шкале MSK-81 или ожидается сход селей ближе 320 км.} \end{cases} \quad (27)$$

$$k_{sa} = \begin{cases} 0, & \text{при } I < 4 \\ 0,40 \left(\frac{I}{5,0} \right)^{\left(\frac{I}{5,0} \right)^{3,0}}, & \text{при } I \geq 4, \end{cases} \quad (28)$$

$$k_{ea} = \begin{cases} 0, & \text{при } l \geq 320 \text{ км} \\ 1, & \text{при } l < 320 \text{ км и } I_e \geq 3, \end{cases} \quad (29)$$

При выводе формулы (26) предполагается, что вредное воздействие процессов подготовки схода селей сводится к воздействию инфразвуковых колебаний породы в селевых очагах по аналогии с явлениями в очагах землетрясений. Если по прогнозу возможен сход селей, то считается, что процессы его подготовки вызывают те же последствия, что и процессы подготовки подземных толчков.

Проверка описанной технологии проведена с помощью опубликованных данных.

Так, согласно [36] перед сходом селя в расположенном поблизости селе разом забеспокоились домашний скот и птица. Однако о скольких-нибудь ощутимых последствиях их волнения не сообщается, поэтому уровень вредного влияния этого геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц следует оценить как низкий. Расчет также показывает низкий уровень данного воздействия.

Во время девятибалльного землетрясения возникает всеобщая паника [1]. Расчет показывает серьезный уровень вредного влияния геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц, что вполне соответствует массовой панической реакции.

Представляет также интерес прогнозирование совместного влияния геодинамических процессов, происходящих в очагах селей и землетрясений. Так, согласно расчетам четырехбалльное землетрясение дает низкий уровень вредного воздействия на сельскохозяйственных животных и птиц. Наличие поблизости селевого очага, из которого ожидается сход селя, также дает низкий уровень этого воздействия. Однако при их совместном влиянии уровень негативного воздействия становится требующим предосторожности.

Анализ обстановки после сейсмического события можно продемонстрировать на следующем примере. Магнитуда землетрясения равна 6, глубина очага составляет 10 км, инфразвуковые колебания несущих конструкций и оборудования отсутствуют. Селевых очагов нет. Зависимость функции принадлежности этого сейсмического события к вредному для сельхозживотных фактору от расстояния до его эпицентра показана табл. 6 и рис. 2.

Как видно из этого рисунка, вредное влияние сейсмических процессов на сельскохозяйственных животных и птиц проявляется на больших расстояниях от эпицентра и может охватывать значительные территории. Соответственно, ущерб от него также может быть значительным.

Это особенно относится к клеточному содержанию животных, для разведения которых этот способ применяется сравнительно недавно, например, индеек.

В частности, взрослые индейки в клетках более чувствительны к различного рода стрессам, чем при напольном содержании [20]. Появление необычных для них предметов в птичнике, внезапные

шум и громкие стуки вызывают настоящую истерию всего поголовья [20]. При этом индейки стараются вырваться из клеток, причем сила этих движений бывает настолько велика, что порой даже крепления дверок не выдерживают ее и птица оказывается на полу птичника [20]. Результатом таких явлений оказывается резкое падение продуктивности, множество травм и переломов костей и зачастую гибель части поголовья [20].

Таблица 6

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для первого примера

Расстояние от эпицентра	0	10	20	30	40	50	60
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,8920	0,7988	0,6598	0,5707	0,5206	0,4894	0,4703
Уровень вредного влияния	4	4	3	3	3	2	2
Расстояние от эпицентра	70	80	90	100	110	120	130
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4562	0,4467	0,4400	0,4347	0,4308	0,4277	0,4253
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	2
Расстояние от эпицентра	140	150	160	170	180	190	200
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4235	0,4208	0,4205	0,4196	0,4188	0,4181	0,2500
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	1
Расстояние от эпицентра	220	240	260	280	300	320	340
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	$3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	0	0

Зависимость степени вредного влияния процесса в очаге землетрясения на сельскохозяйственных от расстояния от эпицентра приведена на рис. 3.

Другим примером является анализ при магнитуде, равной 8, глубине очага 100 км и наличии инфразвуковых колебаний несущих конструкций и оборудования во время подземных толчков.

В этом случае зона серьезного воздействия на сельскохозяйственных существенно расширяется, что иллюстрируется рис. 4, рис. 5 и табл. 7. Из этого следует, что сейсмические события с доста-

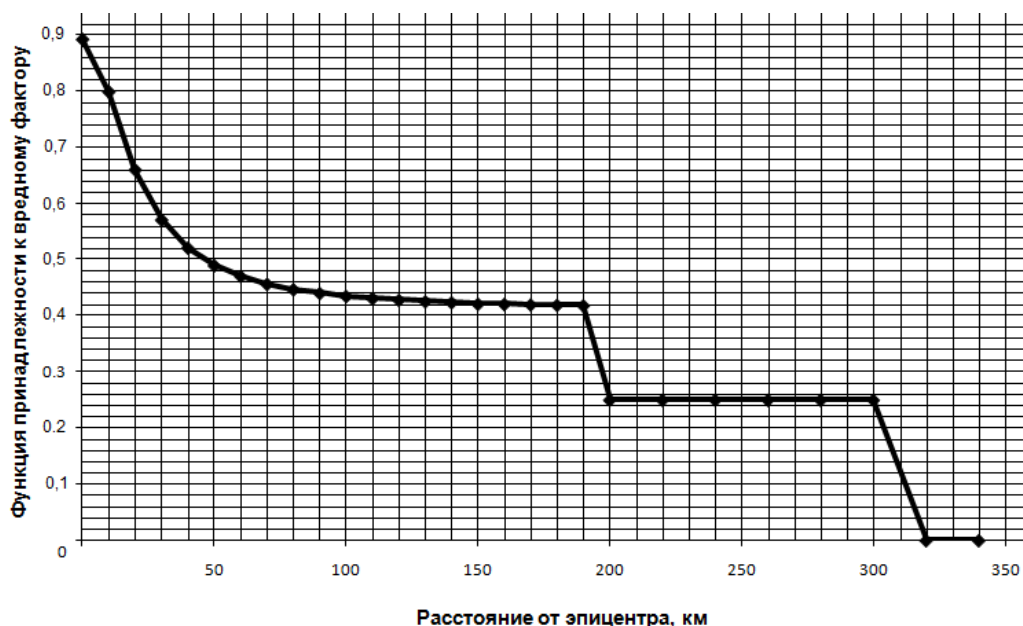


Рис. 2. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору для первого примера

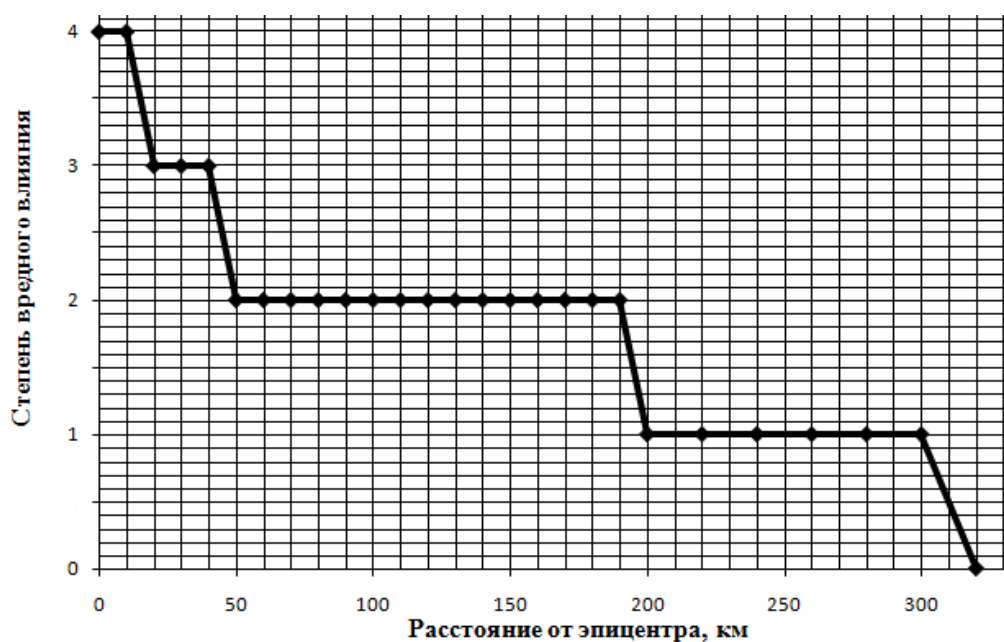


Рис. 3. Зависимость степени принадлежности процесса в очаге землетрясения к вредному для сельскохозяйственных фактору для первого примера

точно большой магнитудой и глубиной очага представляют значительную экономическую опасность для соответствующих хозяйств, что необходимо учитывать при их размещении, проектировании и эксплуатации. Хотя правильно сконструированные и построенные сооружения переносят восьмибалльные землетрясения без существенных повреждений, уровень воздействия подобных сейсмических событий на состояние сельскохозяйственных является весьма небезопасным, что может вызвать серьезные экономические потери.

Это проявляется даже на расстояниях в тысячи километров, охватывая огромные территории, считающиеся асейсмичными, что, в частности, вполне возможно при не таких уж редких Карпатских землетрясениях, которые подробно описаны в [25, 29]. Они вызывали разрушения и человеческие жертвы, однако при соблюдении современных правил сейсмостойкого строительства их вполне можно было бы избежать.

В этом случае практически неопасные для сооружений, но вполне ощутимые движения земной поверхности возникают даже в Московской области. Например, 4 марта 1977 года интенсивность землетрясения в Москве достигала 4-х баллов [29], хотя его очаг был в Румынии. Аналогичная интенсивность подземных толчков наблюдалась также в Киеве, Минске и большей части Крыма [29]. Карпатское землетрясение 1940 г. также ощущалось на очень большом удалении от эпицентра [25].

Вообще, сейсмические события с очагами в районе гор Вранча имеют достаточно частую повторяемость [25]. Поэтому в связи с развитием в настоящее время клеточного содержания животных их вредное влияние, по-видимому, следует учитывать при проектировании и эксплуатации ферм.

Степень принадлежности к вредному фактору

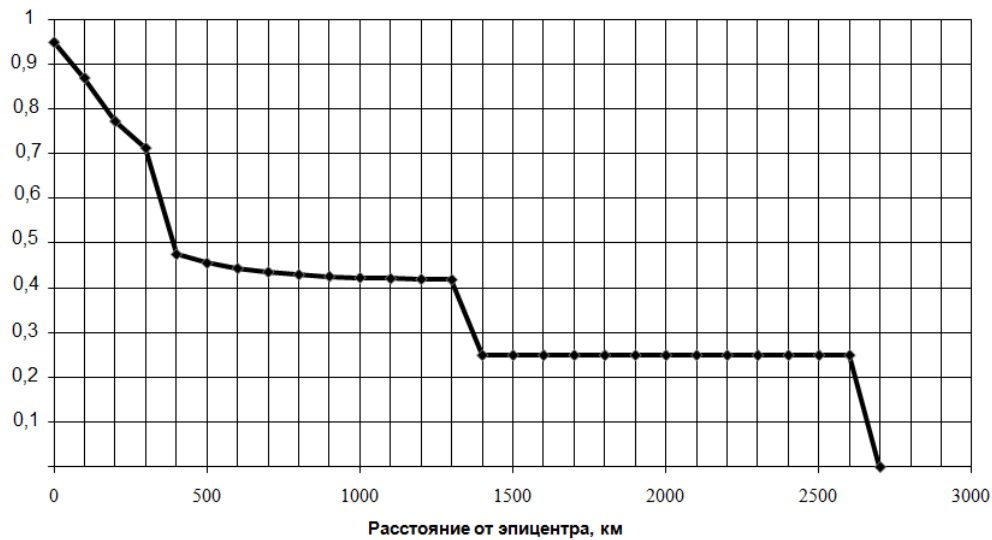


Рис. 4. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору от расстояния от эпицентра для второго примера

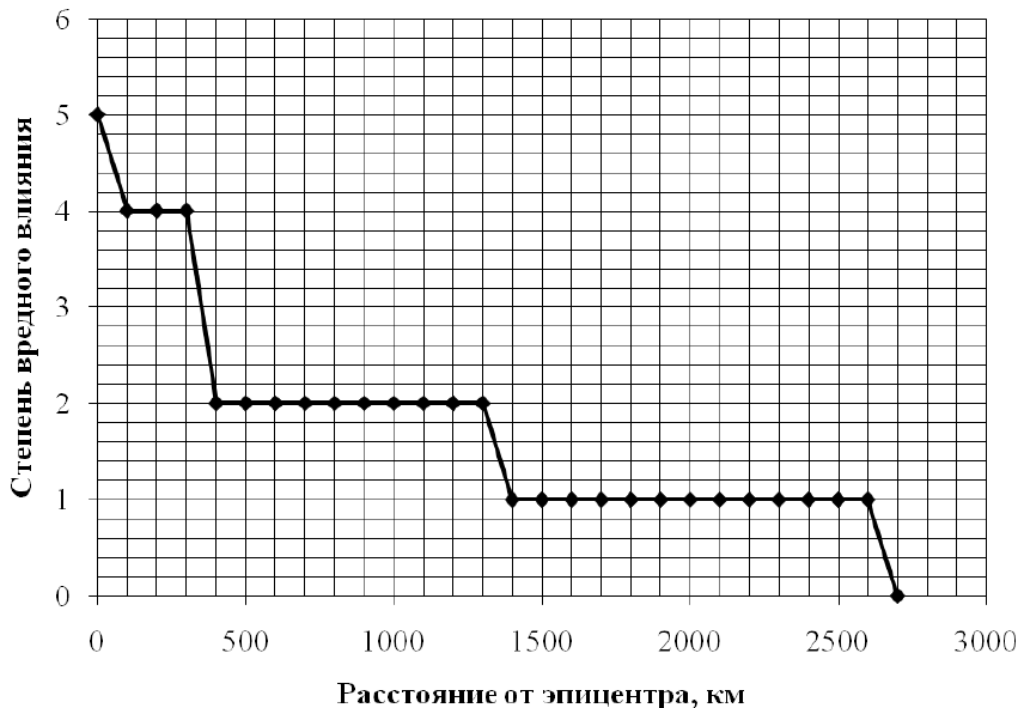


Рис. 5. Зависимость степени вредного влияния землетрясения на сельскохозяйственных животных от расстояния до эпицентра для второго примера

Таблица 7

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для второго примера

Расстояние от эпицентра	0	100	200	300	400	500	600
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,9500	0,8701	0,7731	0,7135	0,4757	0,4562	0,4442
Уровень вредного влияния	5	4	4	4	2	2	2
Расстояние от эпицентра	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,4360	0,4302	0,4263	0,4234	0,4214	0,4199	0,4188
Уровень вредного влияния	2	2	2	2	2	2	2
Расстояние от эпицентра	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	1
Расстояние от эпицентра	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	<0,01
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	0

Если же инфразвуковые колебания элементов конструкции во время землетрясения отсутствуют, то значения функции принадлежности к вредному фактору существенно снижаются, что показано на рис. 6, рис. 7 и в табл. 8.

Следовательно, даже в условиях существенного влияния сейсмических процессов на сельскохозяйственных существуют возможности, по крайней мере, заметного снижения этого влияния за счет адекватных конструктивных решений. Действительно, изменение частоты колебаний оборудования и несущих элементов сооружений не является дорогостоящим мероприятием. Зачастую для этого достаточно сделать их просто более жесткими или использовать демпферы. В тоже время потери от стрессов сельскохозяйственных могут быть весьма значительными и намного превосходить стоимость указанных антисейсмических мероприятий. Это касается, прежде всего, крупных птицефабрик, животноводческих комплексов и ферм, производящих достаточно дорогую продукцию.

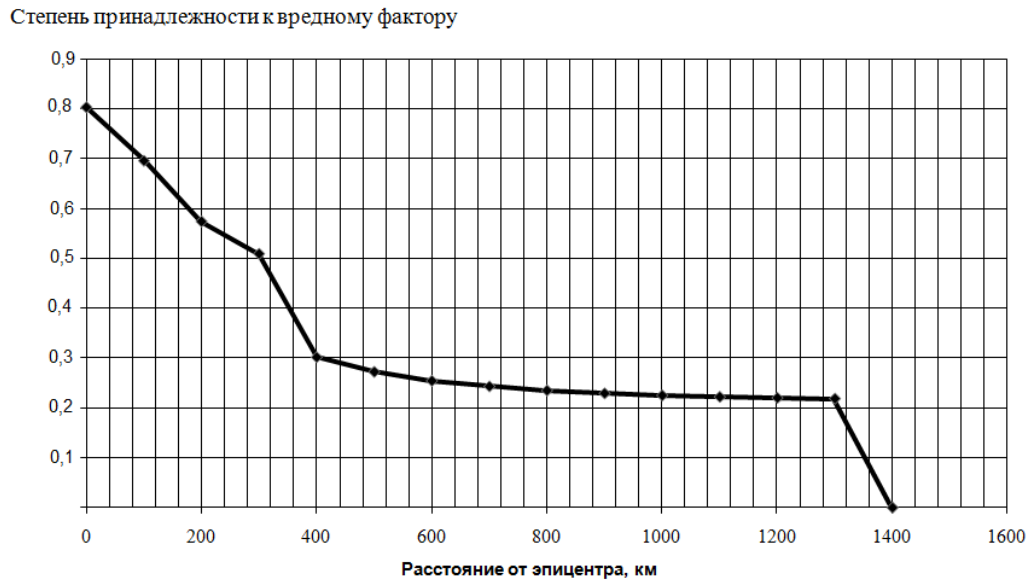


Рис. 6. Зависимость функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельхозживотных фактору от расстояния от эпицентра для третьего примера

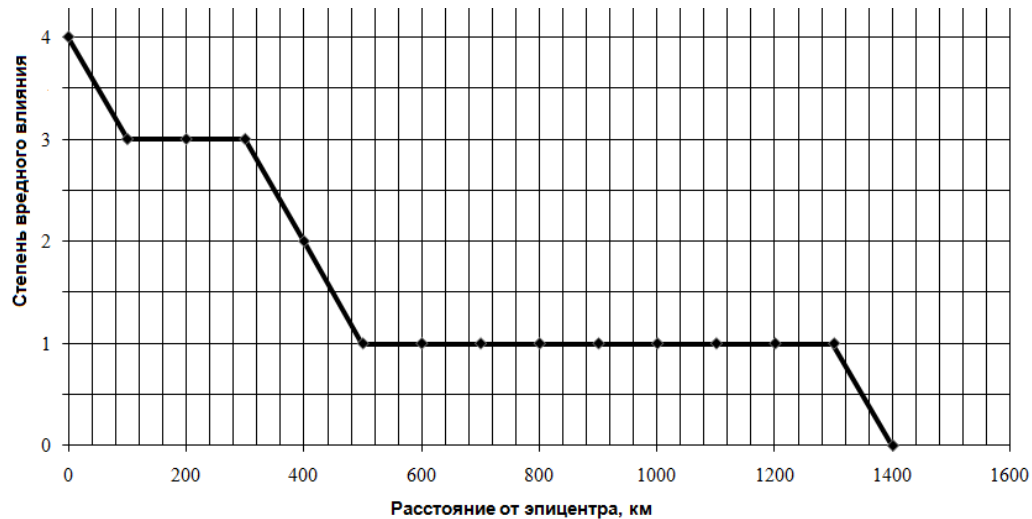


Рис. 7. Зависимость степени вредного влияния землетрясения на сельхозживотных от расстояния до эпицентра для третьего примера

Следующий пример показывает, что даже отдаленные и совершенно неопасные для сооружений подземные толчки могут вызвать стресс у сельхозживотных при наличии на достаточно близком расстоянии селевых очагов.

Схема расположения птицефабрики, селевого очага и эпицентра землетрясения показана на рис. 8.

Магнитуда землетрясения равна 5,4, а глубина очага составляет 5 км. Тогда в селевом очаге

$$I_1 = 1,5 \cdot 5,4 - 3,5 \lg \left(\sqrt{50^2 + 5^2} \right) + 3 = 5,1 \text{ балла},$$

где I_1 — интенсивность землетрясения в селевом очаге по шкале MSK-81 в баллах.

В районе птицефабрики

$$I_2 = 1,5 \cdot 5,4 - 3,5 \lg \left(\sqrt{350^2 + 5^2} \right) + 3 = 2,2 \text{ балла},$$

где I_2 — интенсивность землетрясения в районе птицефабрики по шкале MSK-81 в баллах.

Таблица 8

Значения функции принадлежности сейсмического события к вредному для сельскохозяйственных фактору и уровень вредного влияния для третьего примера

Расстояние от эпицентра	0	100	200	300	400	500	600
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,8047	0,6970	0,5751	0,5102	0,3024	0,2729	0,2549
Уровень вредного влияния	4	3	3	3	2	1	1
Расстояние от эпицентра	700	800	900	1000	1100	1200	1400
Функция принадлежности к вредному для сельскохозяйственных фактору	0,2436	0,2455	0,2297	0,2256	0,2226	0,2207	<0,01
Уровень вредного влияния	1	1	1	1	1	1	0

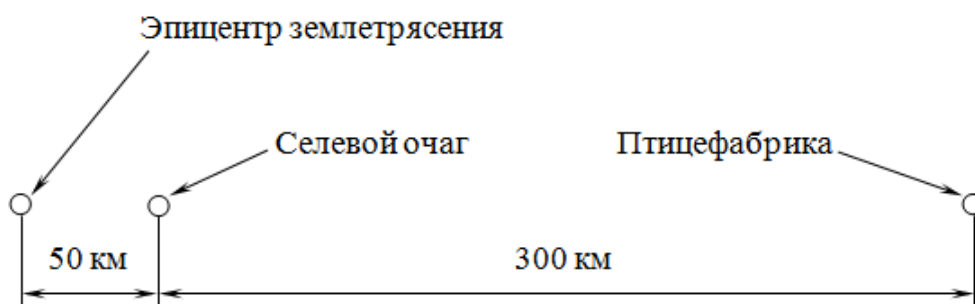


Рис. 8. Расположение птицефабрики, селевого очага и эпицентра землетрясения

Таким образом, интенсивность землетрясения в районе птицефабрики слишком мала, чтобы вызвать стресс у птиц. Очаг землетрясения находится достаточно далеко от нее, и процессы в нем также не могут вызвать стресс у сельскохозяйственных животных.

Если средняя температура воздуха за последние сутки и последние 10 дней равна 5°C при сумме среднесуточных температур воздуха с момента их устойчивого перехода через 0°C в 150°C , биопредвестники и сейсмическая нагрузка отсутствуют, сумма жидких осадков за последние сутки составляет 5 мм при средней интенсивности за последние 3 часа в 1 мм/час и их сумме за последний месяц в 30 мм, угол склона равен 15° , объем погребенных льдов составляет 200000 м^3 , а рыхлого материала – 1000000 м^3 , толщина морены равна 20 м, среднесуточная температура воздуха составляет 6°C , то в соответствии с расчетом селевая опасность отсутствует. Тогда нет и причин для стресса у птиц, обусловленного процессами в очагах землетрясений и селей.

В то же время, если принять во внимание сейсмическую нагрузку, то порода в селевом очаге оказывается в неустойчивом состоянии: ожидается сход селей объемом до 10000 м^3 . Тогда и уровень вредного влияния геодинамического процесса на сельскохозяйственных животных и птиц оказывается хотя и низким, но все-таки не незначительным.

Таким образом, комплексное моделирование обстановки в регионе позволяет предсказывать необычные ситуации, вызванные сочетанием опасных природных явлений, и, соответственно, снижать

потери, которые могут быть весьма значительными для крупных животноводческих хозяйств и птицефабрик.

Прогнозирование сейсмогенных снежных лавин и его использование

Методики прогнозирования возможности схода снежных лавин и их динамических характеристик описаны в [37, 38]. Учет сейсмической нагрузки осуществляется следующим образом [37].

Как показывает математическое моделирование, лавинная опасность при землетрясении такая же, как без него, если вместо толщины снега h и суммы осадков q использовать величины [37]:

$$h_s = k_s [h - (1 - p_{eI} k_\rho k_e) h_{430}] , \quad (30)$$

$$q_s = q + p_{eI} q_e, \quad (31)$$

где h_{430} — толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли, плотность которого больше 430 кг/м³, p_{eI} — вероятность землетрясения интенсивностью I баллов по шкале MSK-81;

$$k_\rho = \frac{2}{\pi} \arctg \left\{ 0,0000149 \cdot \left[I \cdot \left(\frac{910}{\rho_{430}} \right) \right]^{6,906} \right\}, \quad (32)$$

$$k_e = \frac{2}{\pi} \arctg(3,972 \cdot 10^{-9} \cdot I^{9,438}), \quad (33)$$

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{при } I < 5 \\ 1 + 0,2p_{eI}(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 1 + 0,32p_{eI}(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (34)$$

$$q_e = \begin{cases} 0 & \text{при } I < 5 \\ 4,4(I - 5) & \text{при } 5 \leq I < 8 \\ 16,2(I - 5) & \text{при } I \geq 8 \end{cases}, \quad (35)$$

где I — интенсивность землетрясения на поверхности Земли по шкале MSK-81, ρ_{430} — средняя плотность слоя снега, начинающегося у поверхности Земли и имеющего плотность > 430 кг/м³.

Далее по [38] выполняется оценка лавинной опасности и объема возможной лавины. После этого по методологии, описанной в [37], оцениваются ее динамические характеристики.

Весь склон аппроксимируется ломаной линией, как показано на рис. 9.

В начале каждого участка скорость лавины равна v_0 . Ее сход рассматривается как движение материальной точки, но коэффициент трения для каждого участка определяется с учетом всех возможных компонентов многофазной среды.

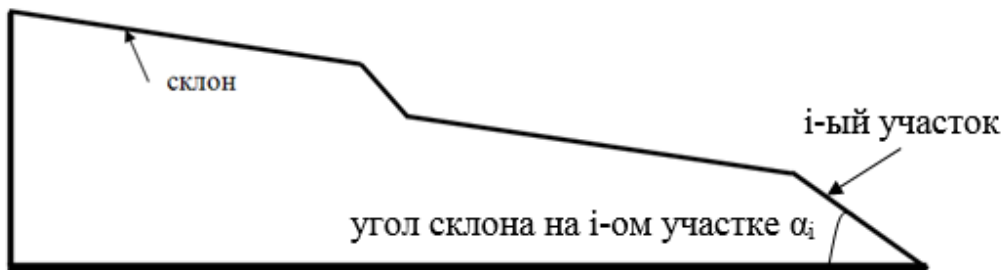


Рис. 9. Аппроксимация горного склона

Расчет ведется по формулам:

$$k = 0,28k_\alpha k_V k_\rho k_2 k_{v0}, \quad (36)$$

где k — коэффициент трения на каком-либо участке, k_α — коэффициент, учитывающий влияние угла склона на коэффициент трения, k_V — коэффициент, учитывающий влияние объема лавины на каком-либо участке на коэффициент трения, k_ρ — коэффициент, учитывающий влияние плотности снега на коэффициент трения, $k_{вл}$ — коэффициент, учитывающий влияние влажности снега на коэффициент трения, k_{v_0} — коэффициент, учитывающий влияние начальной скорости движения лавины на коэффициент трения.

Коэффициенты $k_{\alpha 0}$ и k_{v_0} определяются следующим образом. Сначала вычисляются величины:

$$k_{\alpha 0} = 1 - \frac{1,12}{\pi} \arctg(0,02\alpha), \quad (37)$$

где α — угол склона, градусы; и

$$k_{v_0 0} = 1 - \frac{0,73}{\pi} \arctg(0,6v_0), \quad (38)$$

где v_0 — начальная скорость движения лавины на каком-либо участке.

Затем k_α и k_{v_0} рассчитываются по формулам:

$$k_\alpha = k_{\alpha 0}^{1+0,076 \arctg\left(\frac{1,14}{k_{v_0 0}}\right)}, \quad (39)$$

$$k_{v_0} = k_{v_0 0}^{1+0,069 \arctg\left(\frac{1,12}{k_{\alpha 0}}\right)}. \quad (40)$$

Формулы для расчета других коэффициентов имеют вид:

$$k_v = 1 - \frac{0,64}{\pi} \arctg(0,00044V - 4,2), \quad (41)$$

где V — объем лавины, м³;

$$k_\rho = 1 + \frac{0,68}{\pi} \arctg(0,012\rho - 3), \quad (42)$$

где ρ — плотность снега, кг/м³;

$$k_{2;} = 1 + \frac{1,82}{\pi} \arctg[0,0144m_{2;}(16,2 - m_{2;})] \quad (43)$$

где $m_{вл}$ — доля воды в снеге по массе в процентах;

$$p = k_d(p; + @_2), \quad (44)$$

где

$$p; = \rho v^2 \sin^2(\beta) \cdot \left(1 + \frac{13,2}{\pi} \cdot \arctg\left(\frac{2,1gh_o}{v^2} \cdot \frac{l_0}{l}\right)\right)^{7,4}, \quad (45)$$

$$p_2 = 12000 \cdot \left\{1 - \frac{2}{\pi} \arctg\left[3,4 \cdot \left(\frac{x}{0,26L}\right)^{10,8}\right] + \frac{0,42}{\pi} \arctg(n)\right\}, \quad (46)$$

где v — скорость лавины, м/с, β — угол между лавиной и объектом на склоне, градусы, g — ускорение свободного падения, м/с², h_o — высота объекта, м, l_o — ширина объекта, м, l — ширина участка склона в месте расположения объекта, м, L — расстояние, которое прошло тело лавины, м, — расстояние между точкой остановки лавины и точкой, в которой рассчитывается давление, м (эта величина принимается равной нулю, если давление рассчитывается в точке, которую проходит тело лавины), $n_{п}$ — число превышений снеговоздушной волной расстояния $0,26L$, полученных из опыта в конкретном районе;

$$k_d = 1 + \frac{0,16}{\pi} \arctg(0,03\rho) + \frac{0,41}{\pi} \arctg(1,8\omega_{1o}), \quad (47)$$

где ω_1 — первая собственная частота объекта на склоне, Гц.

Величина коэффициента трения может быть использована и для прогнозирования водоснежных потоков. Действительно, если влажность снега велика, то коэффициент трения мал и сход подобного селя вполне возможен. Для этого должны выполняться, как минимум, два из трех следующих условий:

1. по прогнозу сход лавин возможен (для этого расчета угол склона принимается равным 15° , если он меньше 15° , и толщина слоя снега, начинающегося у поверхности Земли и имеющего плотность $> 430 \text{ кг/м}^3$, равна нулю);
2. тангенс угла склона больше коэффициента трения, вычисленного на каком-либо участке;
3. наблюдаются биологические предвестники схода селей.

Последнее условие связано с тем, что, по данным математического моделирования, перед сходом водоснежного потока в снежной толще может возникать инфразвуковой шум.

После выполнения прогноза целесообразно рассмотреть вопрос о проведении активных воздействий. Кроме того, следует выполнить оценку воздействия прогнозируемых лавин на здания и транспорт. Вполне реальна ситуация, когда на транспортные средства и сооружения будут воздействовать только неопасные снеговоздушные волны. Возможны также и меры по организации безопасного движения транспортных средств по горным дорогам. Все это позволит исключить как человеческие жертвы и материальные потери, связанные со сходом сейсмогенных снежных лавин, так и потери от необоснованных мер предосторожности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coburn A., Spence R. *Earthquake Protection*. Chichester: John Wiley&Sons Ltd.; 1992. 355 p.
2. Brown D. L. Disparate Effects of the 1989 Loma Prieta and 1994 Northridge Earthquakes on Hospital Admissions for Acute Myocardial Infarction: Importance of Superimposition of Triggers. *American Heart Journal*. 1999;137:830–836.
3. Leor J., Kloner R. A. The Northridge Earthquake as a Trigger for Acute Myocardial Infarction. *The American Journal of Cardiology*. 1996;77:1230–1232.
4. Tanaka K., Nakayama M., Tani Y., Watanabe K., Asai J., Hayashi Y., Asashi K., Watanabe Ts. The Great East Japan Earthquake: Blood Pressure Control in Patient with Chronic Kidney Disease. *American Journal of Hypertension*. 2012;25(9):951–954.
5. Уломов В. И. Сейсмическая опасность и «синдром» землетрясений. Медицина катастроф. *Защита*. 1996;1(13):72–80.
6. Мариковский П. И. *Животные предсказывают землетрясения*. Алма-Ата: Наука; 1984. 144 с.
7. Браташов В. А., Кострюкова Н. К., Карпин В. А., Дрожжин Е. В. *Гелиогеофизические факторы риска здоровью населения северных урбанизированных территорий. Биопатогенные эффекты локальных разломов земной коры (на примере г. Сургута)*. Сургут: РИИЦ «Нефть Приобья»; 2006. 76 с.
8. Кострюкова Н. К., Карпин В. А. Локальные разломы земной коры как территориальный фактор риска развития неотложных состояний у жителей нефтегазодобывающих регионов Севера. *Экология человека*. 2004;5:3–6.
9. Белоносов С. М. Применение моментной теории упругости к изучению землетрясений. *Обратные задачи математической физики*. Новосибирск, 1998:15–16.
10. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Харин Е. П. Геомагнитные возмущения и активность животных в лабораторных условиях. *Биофизика*. 2009;54(3):554–562.
11. Игнатосян Г. О., Осипян Л. Л. Спитакское землетрясение: биопредвестники. *Биологический журнал Армении*. 1990;43(4):306–317.
12. Козырева Л. И., Сидорина Н. А., Сидорин А. Я. Перспективы использования рыб в качестве биоиндикатора предвестников землетрясений. *Геофизические процессы и биосфера*. 2004;3(1):5–50.
13. Красногорская Н. В., Протасов В. Р., Харыбин Е. В., Сидорин А. Я., Саблин-Яворский А. Д., Самуйленков Ю. В. Живые системы на службе прогноза землетрясений. *Электромагнитные поля в биосфере*. М.: Наука; 1984;1:315 – 325.
14. Нерселов И. Л., Протасов В. Р., Сидорин А. Я. Биоиндикаторы в автоматизированной системе прогноза землетрясений. *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1988(9):93–99.
15. Рикитаке Т. *Предсказание землетрясений*. М.: Мир; 1979. 338 с.
16. Сидорин А. Я. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука; 1992. 192 с.
17. Чернобыльская авария: Дополнение к INSAG-1. *INSAG-7. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности*. Вена: МАГАТЭ, 1993.

18. Ацюковский В. А., Васильев В. Г. *Обнаружение и нейтрализация геопатогенных излучений Земли*. М.: ООО «Петит»; 2005. 195 с.
19. Кочиш И. И., Петраш М. Г., Смирнов С. Б. *Птицеводство*. М.: КолосС; 2004. 407 с.
20. Шевченко А. И. Клеточное содержание индеек. *Птицеводство*. 2011;5:29–30.
21. Herren R. V. *The Science of Animal Agriculture*. New York: Clifftan Park; 2007. 382 p.
22. Балакирев Н., Колдаева Е., Столбов С. Перспективы развития соболеводства в России. *Главный зоотехник*. 2011;2:44–48.
23. Бондаренко С. П. *Содержание песцов*. М.: ООО «Издательство АСТ»; 2004. 127 с.
24. Бондаренко С. П. *Содержание соболей*. М.: ООО «Издательство АСТ»; 2004. 124 с.
25. Поляков С. В. *Последствия сильных землетрясений*. М.: Стройиздат; 1978. 311 с.
26. Hopes Dim for Avalanche Victims. *Metro*. 2003, March 10, p. 4.
27. Povodelo E., Mullany G. Avalanche in Central Italy Buries Hotel, Leaving Up to 30 Missing. *The New York Times*. 2017, January 20, p. A8.
28. Зимин М. И., Рубцов Е. А., Тимишев В. М., Бейтуганова Н. М., Зими́на С. А. *Моделирование многофазных структурно-неоднородных тел*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет; 2001. 25 с. Деп. в ВИНТИ 27.11.2001, № 2468–В2001.
29. Поляков С. В. *Сейсмостойкие конструкции зданий*. М.: Высшая школа; 1983. 304 с.
30. Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? *Наука и жизнь*. 2013;3:36–42.
31. Зими́на С. А., Зимин М. И. Системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. *Успехи кибернетики*. 2020;1(4):50–60.
32. Зимин М. И. Программное обеспечение для прогнозирования селей. *Естественные и технические науки*. 2017;6:165–174.
33. Znamenskiy V. S., Zimina A. M. Forecasting Adverse Effect of the Earthquake on. *Reflexive Theater of Situational Center-2012: Materials of the 6-th All-Russian Conference with the International Participation*. Omsk: Omsk Institute of Consumer Service Technology; 2013. P. 165–169.
34. Ключкова Е. А. *Охрана труда на железнодорожном транспорте*. М.: Маршрут; 2004. 412 с.
35. Зимин М. И., Шабельников В. А., Тимишев В. М., Зими́на С. А. *Результаты практического применения математического моделирования физико-механических процессов в структурно-неоднородных телах*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 1999. 69 с. Деп. в ВИНТИ 30.12.1999, № 3936–В99.
36. Ершов А. Укрощение «горного духа». *Вокруг света*. 1979;3(2462):14–16.
37. Еськов В. М., Гавриленко Т. В., Зимин М. И., Зими́на С. А. *Нейросетевые принципы в идентификации и изучении систем с хаотической динамикой*. Тула: Издательство ТулГУ; 2016. 398 с.
38. Зимин М. И. *Прогнозирование лавинной опасности*. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат; 2000. 16 с.