

УДК 550.343.64+624.042.7+550.34

ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СЕЙСМОГЕННЫХ ПОДВИЖЕК ПО РАЗРЫВАМ, ПЕРЕСЕКАЮЩИМ ТРАССЫ ТРУБОПРОВОДОВ, И ВЕРОЯТНОСТИ ИХ ПРЕВЫШЕНИЯ

А.Л. СТРОМ¹, А.И. ИВАЩЕНКО², А.И. КОЖУРИН³

¹Институт динамики геосфер РАН, ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ³Геологический институт РАН

Аннотация Рассмотрены методы оценки расчетной величины сейсмогенных смещений по разрывам, пересекающим трубопроводы. Показано, что в условиях недостаточной сейсмогеологической изученности, характерной для многих регионов России, предпочтительным является детерминистический подход к оценке этого параметра. Для оценки риска разрыва трубопровода предлагается определять, при каком смещении запроектированная конструкция не обеспечит его герметичности, и оценивать вероятность возникновения такой «разрушающей» подвижки с учетом вероятностей возникновения землетрясения, выхода разрыва на поверхность и совпадения трассы с участком, где смещение при землетрясении превысит 90 % от максимальной подвижки.

Ключевые слова: сейсмогенные подвижки, расчет, разрыв, трубопровод.

ВВЕДЕНИЕ

При выборе трасс нефте- и газопроводов зачастую не удается избежать пересечения с активными разломами, по которым при землетрясениях возможны единовременные смещения до нескольких метров, представляющие существенную опасность для трубопроводов. Подчеркнем, что нами анализируются именно сейсмогенные смещения; опасность, обусловленная медленными (миллиметры – сантиметры в год) однонаправленными или колебательными движениями по разломам, не связанными с землетрясениями, не рассматривается. Для обеспечения технологической и экологической безопасности трубопроводов разрабатываются специальные конструкции их переходов через сейсмоактивные разломы, обеспечивающие герметичность трубопровода при расчетном смещении ($D_{расч.}$). Соответственно, одной из основных задач изысканий является определение расчетной величины возможной единовременной подвижки.

Помимо этого, для оценки риска разрыва трубопровода и разработки мероприятий по минимизации его последствий необходимо оценивать вероятность возникновения сейсмогенных смещений, превышающих $D_{расч.}$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОГО СМЕЩЕНИЯ

При оценке расчетных сейсмических воздействий для объектов повышенной ответственности, к которым относятся магистральные трубопроводы с

нормативным сроком службы 30 лет, обычно используется карта сейсмического районирования ОСР-97-В и проектирование ведется с учетом сотрясений с повторяемостью 1 раз в 1000 лет. Очевидно, что и при анализе других явлений, связанных с землетрясениями, должен применяться аналогичный подход – т.е. при разработке мер по обеспечению безопасности трубопровода в случае сейсмогенного разрывообразования должны учитываться смещения, которые могут произойти при достаточно редких сильных землетрясениях.

$D_{расч.}$ может определяться как вероятностным, так и детерминистическим способами. Вероятностный способ базируется на использовании глобальных или региональных зависимостей между магнитудой землетрясения, протяженностью разрыва и величиной подвижки по нему [Nowgoози, 1985; Wells, Coppersmith, 1994; Стром, Никонов, 1997, 1999; Matsuda, 1998; Чипизубов, 1998; Лунина, 2001]; детерминистический – на результатах анализа геолого-геоморфологических данных о смещениях по конкретным разрывам, пересекающим трассу. Методика полевого изучения активных разломов наиболее подробно описана в [McCalpin, 1996].

Преимущество вероятностного способа оценки $D_{расч.}$ состоит в том, что он позволяет оценить весь диапазон возможных подвижек совместно с вероятностями их превышения. Однако его практическое использование затруднено, так как в большинстве случаев мы не располагаем незави-

симыми оценками магнитуд землетрясений, связанных с конкретными разломами, пересекаемыми трассой трубопровода или протяженности сегментов этих разломов, на которой возможно единовременное вспарывание. Очень часто магнитуды землетрясений, связанных с отдельными разломами, определяются как раз на основании сейсмогеологических данных о подвижках при прошлых землетрясениях. Получается своего рода «замкнутый круг» – располагая прямыми данными о величинах единовременных подвижек по исследуемому разрыву в отдельных точках, мы оцениваем возможную магнитуду землетрясений, а затем используем это значение для определения величины расчетного смещения. Более того, обычно трудно определить, является ли измеренная в отдельных пунктах подвижка максимальной для разрыва данного палеоземлетрясения, или средней или какой-либо иной. Так как известные соотношения вида $M = f(D)$ выведены именно для максимальных (реже, средних) смещений, это обстоятельство существенно снижает точность оценок магнитуд и, соответственно, последующих оценок $D_{расч}$.

Определить протяженность единовременно образовавшегося разрыва зачастую еще сложнее, так как точность применяемых методов датирования недостаточна для того, чтобы, с одной стороны, выявить наращивание разрыва по простиранию при сближенных во времени землетрясениях, какие произошли, например, по Северо-Анатолийскому разлому [Barka, 1992] или по разломам, обрамляющим Лутскую глыбу в Иране [Nowroozi, Mohajer-Ashjai, 1985], а с другой – доказать одновременность образования поверхностных разрывов, удаленных друг от друга на несколько десятков километров, каковые образовались при землетрясениях 1954 г. в Неваде [Ryall, VanWormer, 1980] или при Суусамырском землетрясении 1992 г. в Киргизии [Ghose et al., 1997].

Следует иметь в виду и то, что глобальные зависимости между параметрами разрывов и землетрясений, полученные по наиболее полным базам данных, неизбежно усредняют закономерности, характерные для разных геодинамических обстановок [Dowrick, Rhoades, 2004] (рис. 1), а региональные, установленные для отдельных сейсмоактивных регионов, могут и не подходить для тех районов, где ведется строительство.

Поэтому на практике для определения $D_{расч}$ часто используется детерминистический способ, когда величина возможной единовременной подвижки определяется на основе геолого-геоморфологических данных о смещениях по исследуемому разрыву при прошлых землетрясениях, измеренных как непосредственно в точке пересечения, так и в других частях разрыва. В зависимости от степени изученности и разброса полу-

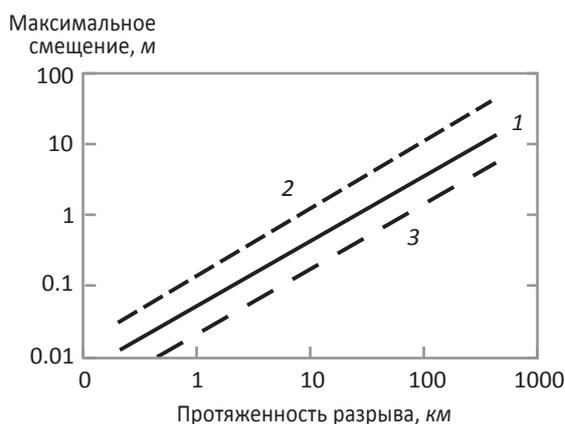


Рис. 1. Зависимость величины максимальной подвижки по разрыву от протяженности поверхностного разрыва. Для всей совокупности землетрясений мира (1), землетрясений Японии и Сахалина (2) и землетрясений Калифорнии (3)

ченных значений, в качестве расчетной величины принимается либо наиболее часто встречающееся смещение, либо смещение, измеренное непосредственно в точке пересечения, особенно если схожие значения имели несколько последовательных подвижек. В международной практике в качестве расчетной величины иногда принимается смещение, равное 2/3 от максимальной зарегистрированной (или ожидаемой) подвижки по исследуемому разлому. Такой прием использовался, в частности, при проектировании Транс-Аляскинского нефтепровода и вполне оправдался при землетрясении Денали 2002 г., когда смещение по разрыву, пересекающему трубопровод (~5.5 м) оказалось близко к принятому расчетному смещению (6 м). Следует отметить, что максимальное смещение по разрыву при этом землетрясении действительно составило около 9 м [Haussler et al., 2004]. Использование в качестве расчетной величины 2/3 от максимальной подвижки позволяет отказаться от наиболее консервативных оценок величин смещений и, в то же время, обеспечить достаточную надежность конструкции переходов через разломы, хотя при этом сохраняется значимая вероятность того, что подвижка превысит расчетное значение.

Важно, чтобы подход к выбору расчетной величины подвижки для всех пересечений с разломами по исследуемой трассе был единым – в качестве расчетных принимаются либо некоторые осредненные оценки, либо величины подвижек, измеренные на участках пересечения.

Для того, чтобы решить, какие смещения в пределах установленного диапазона возможных значений следует принимать в качестве расчетных, желательно определить влияние величины рас-

четной подвижки на стоимость разработки, строительства и эксплуатации конструкции перехода трубопровода через разрыв, обеспечивающей герметичность трубопровода.

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕВЫШЕНИЯ РАСЧЕТНОГО СМЕЩЕНИЯ

Очевидно, что нельзя полностью исключить возможность того, что фактическое смещение по разрыву при землетрясении превысит принятое расчетное значение, вне зависимости от того, каким способом оно было определено (если не брать в качестве расчетных заведомо завышенные величины смещений, что, очевидно, существенно усложнит и удорожит разработку работоспособной конструкции перехода). Поэтому для оценки риска разрыва трубопровода и разработки мероприятий по минимизации его последствий необходимо оценить вероятность возникновения сейсмогенных смещений, превышающих $D_{\text{расч.}}$. Как показывает практика, в тектонически и сейсмически активных регионах $D_{\text{расч.}}$ может составлять несколько метров.

Поскольку переход трубопровода через разлом, как любое инженерное сооружение, проектируется с определенными запасами, очевидно, что если фактическое смещение превысит расчетное на несколько процентов (сантиметров), то правильно спроектированная и качественно выполненная конструкция перехода должна выдержать и такую подвижку, т.е. не должно произойти разрыва трубы. Поэтому при решении этой задачи необходимо в первую очередь определить, при каком смещении по разрыву запроектированная конструкция перехода уже не обеспечит герметичности трубопровода, и оценивать вероятность возникновения именно такой – «разрушающей» подвижки ($D_{\text{разр.}}$). Для того чтобы перейти от детерминистической оценки расчетных смещений, полученной на основании данных о реально произошедших подвижках по разломам, пересекающим эту трассу, к оценке вероятности возникновения больших смещений, рекомендуемые расчетные и разрушающие смещения приравниваются к значениям смещений, которые могли бы быть определены вероятностными методами.

Анализ «работоспособности» конструкций переходов через разломы, проведенный при изысканиях по трассе одного из магистральных трубопроводов на Сахалине показал, что $D_{\text{разр.}} \approx 1.5 \cdot D_{\text{расч.}}$. Следуя упомянутой выше сложившейся международной практике, мы приравнивали принятое расчетное смещение к 2/3 от максимальной подвижки. Тогда вероятность возникновения разрушающей подвижки равна вероятности возникновения максимальной подвижки по разры-

ву (D_{max}) при сильном землетрясении в пределах конкретной зоны разломов.

Условная вероятность такой подвижки ($P_{\text{разр.}}$) равна произведению ряда вероятностей: вероятности возникновения за срок службы трубопровода землетрясения, при котором подвижка может превысить принятое расчетное смещение ($P_{\text{земл.}}$), вероятности выхода разрыва на поверхность ($P_{\text{вых.}}$) и вероятности попадания пересечения на участок, где смещение при данном землетрясении будет максимальным (P_{max}). Учитывая относительно низкую точность полевых замеров величины подвижки при обследовании большинства сейсмогенных разрывов, мы предлагаем учитывать вероятность попадания пересечения на участок разрыва, где смещение превысит 90% от максимального ($P_{0.9\text{max}}$). Тогда

$$P_{\text{разр.}} = P_{\text{земл.}} \cdot P_{\text{вых.}} \cdot P_{0.9\text{max}} \quad (1)$$

Оценивая вероятность возникновения землетрясения ($P_{\text{земл.}}$), можно принимать повторяемость землетрясения на конкретном участке пересечения равной 1 раз в 1000 лет (стандартная повторяемость для расчетов сейсмостойкости трубопроводов, допускающих пластическое деформирование металла без разрыва). При этом годовая вероятность возникновения землетрясения $P_{\text{земл.}} \sim 10^{-3}$. Однако повторяемость землетрясений может быть уточнена с учетом имеющихся палеосейсмологических данных. Так, для Сахалина реальный период повторяемости разрывообразующих землетрясений на конкретном сегменте разрыва составляет первые тысячи лет [Булгаков и др., 2002]. Это согласуется с результатами анализа графика повторяемости, согласно которому периоды повторяемости событий с $M = 6.0 - 8.0$ для Сахалина составляют от 136 до ~6000 лет. Поскольку предполагается, что очаги сильных землетрясений приурочены именно к зонам крупных сейсмогенерирующих разломов, то, зная примерную протяженность очагов землетрясений разной магнитуды и общую протяженность крупных сейсмогенерирующих разломов Сахалина, можно оценить период повторяемости землетрясений в произвольно взятой точке на разломе, который составляет от 2000 до 6000 лет (рис. 2).

Как отмечено выше, в рамках данной задачи, оценивая максимально возможную вероятность возникновения разрывообразующего землетрясения, следует учитывать только те события, предельные смещения при которых могут достигать или превосходить значения $D_{\text{разр.}}$ [Стром, Иванов, 1997]. Применительно к исследуемому району, это землетрясения с $M \geq 7.0$, вероятность возникновения которых на конкретном участке сейсмогенерирующего разлома составляет $(3-5) \cdot 10^{-4}$. Соответственно, дальнейший анализ также проводился для таких землетрясений.

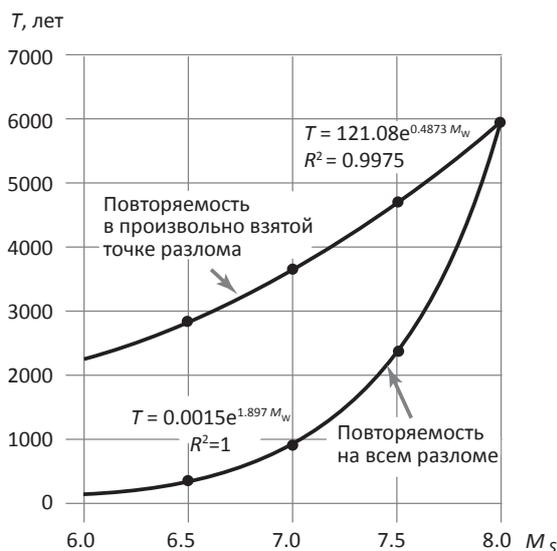


Рис. 2. Период повторяемости землетрясений разных магнитуд для южной части Сахалина. Значения T относятся к интервалу магнитуд $M \pm 0.25$

Вероятность выхода разрыва на поверхность ($P_{\text{вых.}}$) может быть оценена, как отношение числа известных разрывообразующих землетрясений к общему числу коровых землетрясений. Такой анализ для землетрясений в пределах суши за период с 1976 по 1996 гг. приведен в работе [Стром, 2000]. Соответствующие значения для землетрясений Японии приведены в работе [Otsuka, 1964]. На основании этих данных значение $P_{\text{вых}}$ для землетрясений с $M > 7.0$ может быть принято равным 0.5–1.0.

Значение $P_{0.9\text{max}}$ может быть определено на основании анализа закономерностей распределения смещений вдоль сейсмогенных разрывов.

В зависимости от механизма очагов землетрясений (кинематики разрыва) смещения, превышающие 2/3 от максимального, в среднем характерны лишь для 18–25 % протяженности разрыва. Подвижка, превышающая $0.9 D_{\text{max}}$, характерна, опять же в среднем, для 5–10 % протяженности разрыва (рис. 3). Соответственно, вероят-

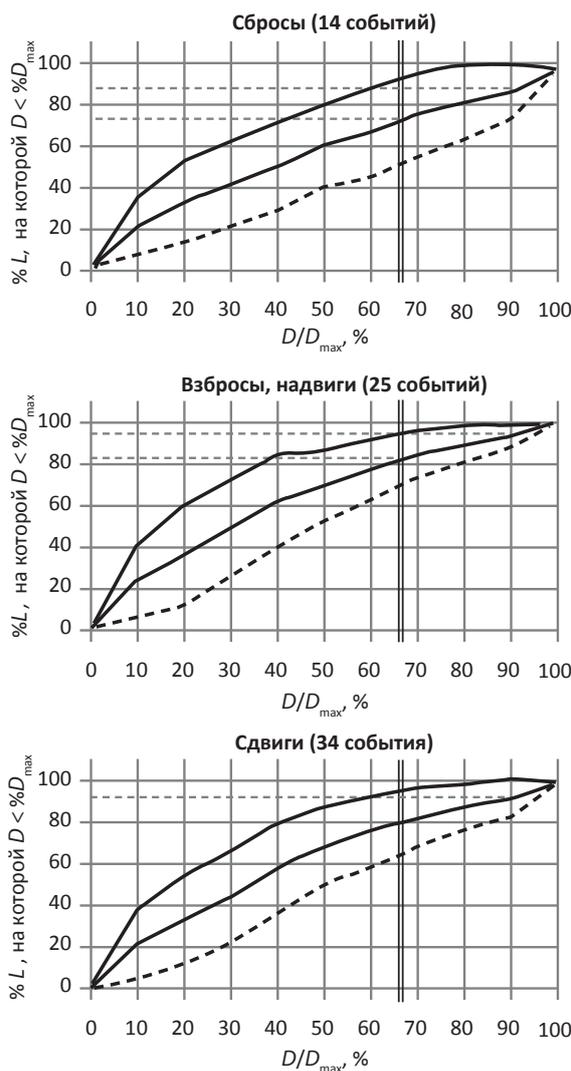


Рис. 3. Протяженность части сейсмогенного разрыва, смещение по которой не превосходит определенной доли от максимальной подвижки.

Графики построены по данным о распределении смещений по разрывам землетрясений с различной кинематикой. Показаны средние значения их разброса. Двойная вертикальная черта соответствует 2/3 от максимальной подвижки

Таблица 1. Оценки вероятности выхода сейсмогенного разрыва на дневную поверхность при землетрясениях с различной магнитудой

	Магнитуда M_s :					
	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Для землетрясений Японии с очагами в земной коре (Otsuka, 1964)	0.06	0.11	0.22	0.46	1.0	1.0
Среднемировые оценки (Стром, 2000)	0.008	0.056	0.17	0.30	0.42	0.6

ность попадания трассы на участок разрыва, где подвижка превысит расчетную, составит ~ 0.2 , а на участок, где она превысит $0.9 D_{\max} - 0.05 - 0.1$ ($P_{0.9\max} = 0.05 - 0.1$).

Таким образом, результирующее значение вероятности возникновения «разрушительной» подвижки в расчете на год составляет:

$$\begin{aligned} P_{\text{разр.}} &= P_{\text{земл.}} \cdot P_{\text{вых.}} \cdot P_{0.9\max} = \\ &= (3-5) \cdot 10^{-4} \cdot (0.5-1.0) \cdot (0.05-0.1) = \\ &= 5 \cdot 10^{-5} - 7.5 \cdot 10^{-6}, \end{aligned} \quad (2)$$

что соответствует 1 событию за период в 20 000–133 000 лет.

ЛИТЕРАТУРА

- Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстраинов В.М., Стром А.Л., Судзуки Й., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимимото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Й. Активные разломы Сахалина // Геотектоника. 2002. № 36. С. 227–246.
- Лунина О.В. Влияние напряженного состояния литосферы на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуд землетрясений // Геология и геофизика. 2001. № 42. С. 1389–1398.
- Стром А.Л. Оценка величин сейсмогенных смещений по разломам и вероятности их возникновения. Оценка и управление природными рисками // Материалы конференции «Риск-2000». М., 2000. С. 37–41.
- Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношение между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.
- Стром А.Л., Никонов А.А. Распределение смещений вдоль сейсмогенных разрывов и учет неравномерности подвижек при палеосейсмологических исследованиях // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 47–59.
- Чипизубов А.В. Выделение одноактных и разновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика. 1998. Т. 39, № 3. С. 386–398.
- Barka A. The North Anatolian fault zone // Annales Tectonicae. 1992. Spec. Iss., Supplement to V. 6. P. 164–195.
- Dowrick D.J., Rhoades D.A. Relations between earthquake magnitude and fault rupture dimensions: how regionally variable are they? // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2004. Vol. 94. P. 776–788.
- Если на рассматриваемом участке разлома произойдет более сильное землетрясение, вероятность того, что подвижка достигнет или превысит пороговое значение $D_{\text{разр.}}$ будет, естественно, выше, но, поскольку вероятность возникновения такого землетрясения меньше, результирующая условная вероятность не будет существенно отличаться от полученных оценок.
- Материал хранится в Институте динамики геосфер РАН, Москва, 119334. Ленинский пр. 38, корп. 1, (495) 939-79-80, a.strom@g23.relcom.ru
- Haeussler P.J., Schwartz D.P., Dawson T.E., Stenner H.D., Lienkaemper J.J., Sherrod B., Cinti F.R., Montone P., Craw P.A., Crone A.J., Personius S.F. Surface Rupture and Slip Distribution of the Denali and Totschunda Faults in the 3 November 2002 M 7.9 Earthquake, Alaska // BSSA. 2004, No 6B, P. 23–52.
- Ghose S., Mellors R.J., Korjenkov A.M., Hamburger M.W., Pavlis T.L., Pavlis G.L., Omuraliev M., Mamyrov E., Muraliev A.R. The $M_s=7.3$ 1992 Suusamyр, Kyrgyzstan, Earthquake in the Tien Shan: 2. Aftershock focal mechanisms and surface deformation // Seismol. Soc. of Amer. Bull., 1997. Vol. 87, P. 23–38.
- McCalpin, J.P. (Ed.) Paleoseismology. Academic Press, San Diego, 1996. 588 pp.
- Matsuda T. Present state of long-term prediction of earthquakes based on active fault data in Japan Zisin // J. Seismol. Soc. Japan, 2nd ser., 1998. Vol. 50. P. 23–33.
- Nowroozi A.A. Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1985. Vol. 75, P. 1327–1338.
- Nowroozi A.A., Mohajer-Ashjai A. Fault movements and tectonics of Eastern Iran: Boundaries of the Lut Plate // Geophys. J. Royal Astron. Soc., 1985. Vol. 83, P. 215–237.
- Otsuka M. Earthquake magnitude and surface fault formation // J. Phys. Earth, 1964, Vol. 12, P. 19–24.
- Ryall A.S., VanWormer J.D. Estimations of maximum magnitude and recommended seismic zone changes in the Western Great Basin // Seismological Society of America Bulletin, 1980. Vol. 70, P. 1573–1581.
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. Vol. 84, P. 974–1002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

СТРОМ АЛЕКСАНДР ЛЕОНИДОВИЧ

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт динамики геосфер РАН. 119334, Москва, Ленинский проспект, 38, стр. 1.
Тел.: (495) 939-79-80, факс: (495) 137-65-11. E-mail: a.strom@g23.relcom.ru.

ИВАЩЕНКО АЛЕКСЕЙ ИЛЛАРИОНОВИЧ

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36.
Тел./факс: (495) 124-87-13. E-mail: aii_imgg@mail.ru

КОЖУРИН АНДРЕЙ ИВАНОВИЧ

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник. Геологический институт РАН. 119017, Москва, Пыжевский пер., 7.
Тел.: (495) 959-26-07. E-mail: kozhurin@ginras.ru

ENG

ASSESSMENT OF THE DESIGN DISPLACEMENT VALUES ALONG FAULTS THAT CROSS PIPELINE ROUTES AND THEIR EXCEEDANCE PROBABILITY

A. L. STROM, A. I. IVASHCHENKO, A. I. KOZHURIN

ABSTRACT Assessment methods of the design seismogenic displacements along faults that cross pipeline routes are examined. It is shown that deterministic approach for this parameter estimation is preferable in many regions of Russia characterized by scanty seismogeological knowledge. To estimate risk of pipeline rupturing it is proposed to determine at which displacement value the designed crossing will not guarantee its tightness and to estimate probability of such «damaging» offset, considering probabilities of the earthquake occurrence, of surface rupturing and of pipeline route coincidence with fault section where offset will exceed 90 % of maximal value.