

А.В. Абрамова

(ДВЮИ МВД России; Хабаровск; e-mail: bastxxx@mail.ru)

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РИСКА НА ТЕРРИТОРИИ АРМЕНИИ

Рассматривается математическая модель восстановления полей тектонических напряжений и смещений на территории Армении, включая её древние исторические границы, на основе анализа косвенных признаков геодинамической неустойчивости. Применяется методология нечёткого моделирования.

Ключевые слова: тектонические напряжения и смещения, геодинамическая неустойчивость и риски, моделирование, нечёткая модель.

A.V. Abramova

MATHEMATICAL MODELS OF GEODYNAMIC RISK ASSESSMENT FOR THE TERRITORY OF ARMENIA

Developed a mathematical model of recovery field tectonic stresses and displacements based on the analysis of indirect signs geodynamic instability on the territory of Armenia, including its ancient boundaries. The methodology applies fuzzy modeling.

Key words: tectonic stresses and displacements, geodynamic instability and risks, modeling, fuzzy model.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 13 августа 2014 г.

Для оценки геодинамического риска на территории Армении исследованиям был подвергнут регион, расположенный между 35.°35 и 50.°18 в.д. и между 34.°75 и 44.°42 с.ш., включающий в себя территории Армении, Грузии, Азербайджана, части территорий России, Турции, Ирана, Ирака, Сирии (рис. 1). На этом рисунке, заимствованном из работы [1], исследуемая территория обозначена прямоугольником красного цвета.

В сейсмическом отношении этот регион является в высокой степени активным [1-3]. Только за период с 1993 г. по сентябрь 2012 г. на этой территории произошло 3747 сейсмических событий в диапазоне магнитуд $M = 3.1 \div 6.7$ (из них 41 событие с магнитудой $M \geq 5.5$ [4, 5]. Такая сейсмическая активность во многом обусловлена особенностями тектонического строения этой территории.

Согласно многочисленным сейсмологическим и геолого-геофизическим исследованиям, а также данным, полученным при дешифрировании глобальных и региональных космических снимков, определяющую роль в геодинамике рассматриваемой территории играют такие тектонические структуры, как "периа-рабская офиолитовая дуга", являющаяся северным продолжением системы Восточноафриканской рифтовой зоны, Центрально-Иранский взбросо-сдвиг (обозначен на рис. 1 цифрой 4), главный надвиг (поддвиг) Загроса (обозначен

цифрой 5), шарьяжи Центрального и Восточного Тавра (обозначены цифрой 3), главный надвиг (поддвиг) Большого Кавказского хребта (обозначен цифрой 1) и главный надвиг (поддвиг) Малого Кавказа (обозначен цифрой 2) [1, 2].

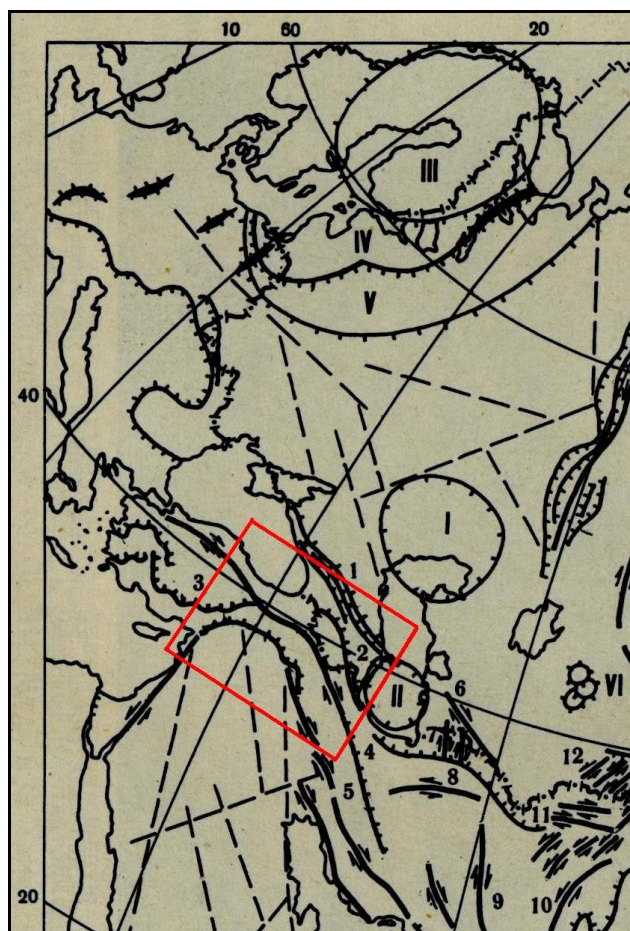


Рис. 1. Территория исследуемого региона

Исследованиям сейсмической активности этого региона посвящено значительное количество публикаций. В настоящей статье предпринята попытка выполнить районирование рассматриваемой территории по степени геодинамического риска, основываясь исключительно на методах математического моделирования [3, 6-9].

Математическая технология оценки мест возможного возникновения геодинамических катастроф, в частности землетрясений, основана на количественном анализе пространственного распределения геодинамических аномалий. Иными словами, на основе анализа косвенных признаков геодинамической неустойчивости, например, горизонтальных градиентов аномалий гравитационного поля в изостатической редукции, строится математическая модель состояния геологической среды исследуемой территории, и по результатам математического моделирования выполняется восстановление полей тектонических напряжений и смещений в этой среде [6, 8, 9].

В соответствии с этой технологией, например, распределённое внешнее воздействие $P(x, y)$, известные дискретные значения которого заданы с некоторым фиксированным шагом по осям X и Y , представляются в виде ряда (1), то есть выполняется разложение аномального гравитационного поля в изостатической редукции на составляющие его зональные гармоники:

$$P(x, y) = \frac{p_{00}}{4} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s p_{m0} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l p_{0n} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l p_{mn}, \quad (1)$$

где, например,

$$p_{mn} = a_{mn} \cos k_x x \cos k_y y + b_{mn} \sin k_x x \cos k_y y + c_{mn} \cos k_x x \sin k_y y + d_{mn} \sin k_x x \sin k_y y;$$

$$a_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x, y) \cos k_x x \cos k_y y dx dy;$$

$$k_x = \frac{\pi m}{a};$$

$$k_y = \frac{\pi n}{b};$$

a, b – соответственно длина (X) и ширина (Y) рассматриваемой территории;

$p(x, y)$ – величины изостатических аномалий гравитационного поля.

Тогда компоненты тензора напряжений и составляющие вектора смещений в геологической среде представляются аналогичным образом, например, для нормальных компонент тензора напряжений соотношениями вида (2):

$$\sigma_{\beta}(x, y, z) = \frac{1}{4} \sigma_{\beta}^{(00)} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^s \sigma_{\beta}^{(m0)} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^l \sigma_{\beta}^{(0n)} + \sum_{m=1}^s \sum_{n=1}^l \sigma_{\beta}^{(mn)}, \quad (2)$$

где $\beta \in \{x, y, z\}$.

Однако к территориям, значительно неоднородным в тектоническом отношении, каковой является территория рассматриваемого региона, применение детерминированных и вероятностных математических моделей, лежащих в основе существующей технологии оценки геодинамического риска, не всегда представляется оправданным [7]. Поэтому при оценке сейсмической активности рассматриваемой территории, наряду с уже разработанными моделями, была применена методология нечёткого моделирования [10].

При таком подходе при формировании базы правил системы нечёткого вывода в качестве входных переменных использовались характеристики геологической среды, полученные как на основании анализа макросейсмических и других данных по землетрясениям, так и информация о напряжениях и смещениях, рассчитанных в ходе применения детерминированных и вероятностных математических моделей. В результате был определен набор входных переменных, который затем был подвергнут процедуре фаззификации.

Так, например, функция принадлежности вертикальных смещений в геологической среде u_z (мм/год) была представлена в виде набора кусочно-линейных функций вида

$$\mu_{T_1}(u_z) = a_i u_z + b_i, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

а функция принадлежности относительной плотности потенциальной энергии деформируемых пород геологической среды E_p (Дж/(м³·год)) – логарифмической зависимостью вида

$$\mu_{T_2}(E_p) = d + c \lg(E_p). \quad (3)$$

В соотношениях (2) и (3) символами $\mu_{T_1}(u_z)$ и $\mu_{T_2}(E_p)$ обозначены термножества соответствующих лингвистических переменных с коэффициентами $a_i, b_i, c, d \in \mathcal{R}$.

Для реализации нечёткого вывода был применён алгоритм Мамдани, то есть для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечётких продукций использовались нечёткие логические операции. Те правила, степень истинности которых была отлична от нуля, считались активными и использовались для дальнейших расчётов. Активизация подзаключений осуществлялась на основании min-активизации, при этом учитывались только активные правила нечётких продукций. Аккумуляция заключений нечётких правил продукций выполнялась на основании операции объединения нечётких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным. Для дефаззификации выходных переменных применялся традиционный метод центра тяжести по соотношению вида

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}, \quad (4)$$

где x, y – входная и выходная переменные соответственно.

Кратко проанализируем полученные результаты.

На рис. 2 представлено эквипотенциальное распределение значений вероятностного геодинамического риска r , осредненных по площадкам 560 км². Участки, оконтуренные изолиниями с величиной вероятностного геодинамического риска 0.5, соответствуют зонам незначительного риска; участки, оконтуренные изолиниями с величиной риска 0.6, соответствуют зонам умеренного риска; с величиной 0.7 – зонам значительного риска; 0.8 – высокого риска и с величиной 0.9 соответствуют зонам чрезвычайного риска. Участки, на которых величина вероятностного геодинамического риска составляет менее 0.5, мы назвали зонами слабого (потенциального) риска).

В процентном отношении покрытие рассматриваемой территории зонами геодинамического риска соответствующего уровня приведено в табл. 1.

Территорию современной Армении, согласно данным рис. 2 и табл. 1, можно в целом охарактеризовать как территорию значительного и высокого риска, что соответствует настоящему геодинамическому состоянию этого региона, оцениваемого как высоко сейсмически активное (рис. 3).



Рис. 2. Карта эквипотенциального распределения значений вероятностного геодинамического риска, осреднённых по площадкам 560 км². Сечение изолиний 0.1

Таблица 1

№	Уровень риска	Диапазон значений риска, r	Площадь покрытия территории, %
1.	Слабый (потенциальный)	$r < 0.5$	1.5
2.	Незначительный	$0.5 \leq r < 0.6$	11.3
3.	Умеренный	$0.6 \leq r < 0.7$	30.4
4.	Значительный	$0.7 \leq r < 0.8$	31.6
5.	Высокий	$0.8 \leq r < 0.9$	21.7
6.	Чрезвычайный	$r > 0.9$	3.5

Если же говорить об Армении в историческом плане, то есть о территории Великой Армении, то в её пределах представлены практически все определенные в табл. 1 зоны риска, за исключением зон слабого (потенциального) риска. Наибольшую опасность представляют зоны чрезвычайного риска, в районе озера Ван в самом центре Великой Армении, и в районе озера Урмия (на юго-восточных границах Великой Армении). Именно в этих зонах располагаются эпицентры исторических катастрофических землетрясений [4, 5], принесших в свое время неисчислимые бедствия жителям древнего и могущественного государства.

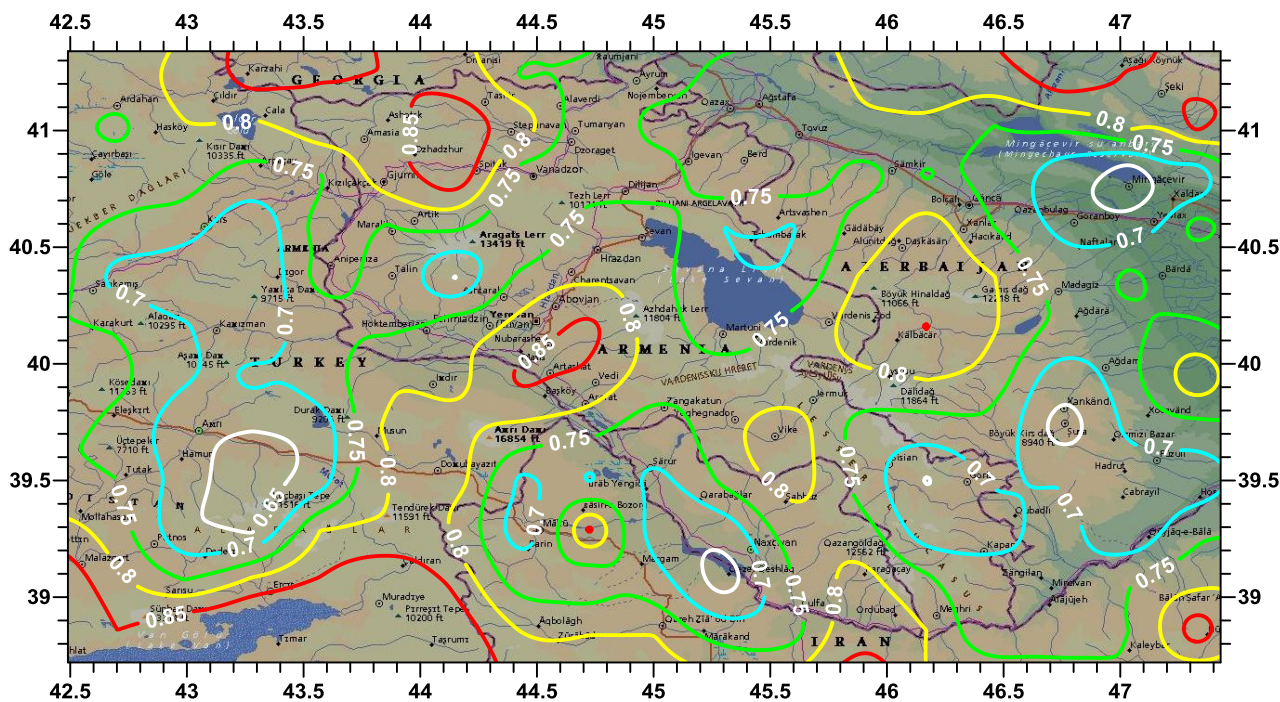


Рис. 3. Эквипотенциальное распределение вероятностного геодинамического риска на территории современной Армении и прилегающих к ней государств.
Сечение изолиний равно 0.05

Представим также карту распределения векторов горизонтальных проекций полных сдвиговых напряжений в геологической среде исследуемой территории, полученную по результатам математического моделирования (рис. 4).

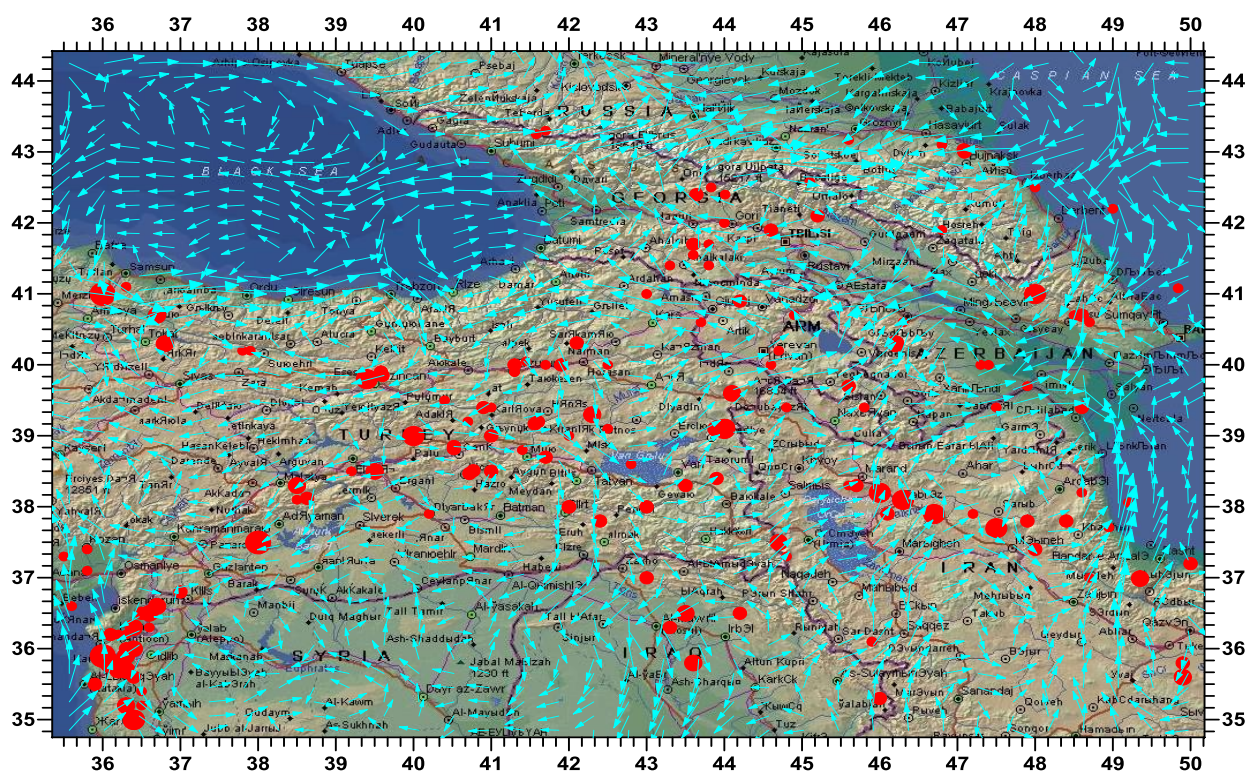


Рис. 4. Векторы горизонтальных проекций полных сдвиговых напряжений с эпицентрами исторических землетрясений $M = 6.0 \div 8.7$

Векторы, изображенные на рис. 4, не являются отражением истинных движений в геологической среде. Они отображают лишь тенденцию изменения пространственного поля распределения сдвиговых напряжений, что позволяет в некотором смысле оценить динамику опасных геологических процессов, происходящих в литосфере. На необходимость таких оценок по структуре поля распределения векторов горизонтальных проекций полных сдвиговых напряжений указывает значимая связь приуроченности эпицентров катастрофических исторических землетрясений с магнитудой $M = 6.0 \div 8.7$ к участкам, в пределах которых векторы либо меняют свою ориентацию, либо являются противонаправленными относительно друг друга. Кроме того, направление векторов также связано с протяженными тектоническими структурами, о которых упомянуто в начале статьи (рис. 1) [1], и с информацией о современных горизонтальных движениях, полученной по данным космической геодезии [3].

Также приведем для территории современной Армении распределение векторов горизонтальных сдвиговых напряжений, полученное по результатам математического моделирования (рис. 5).

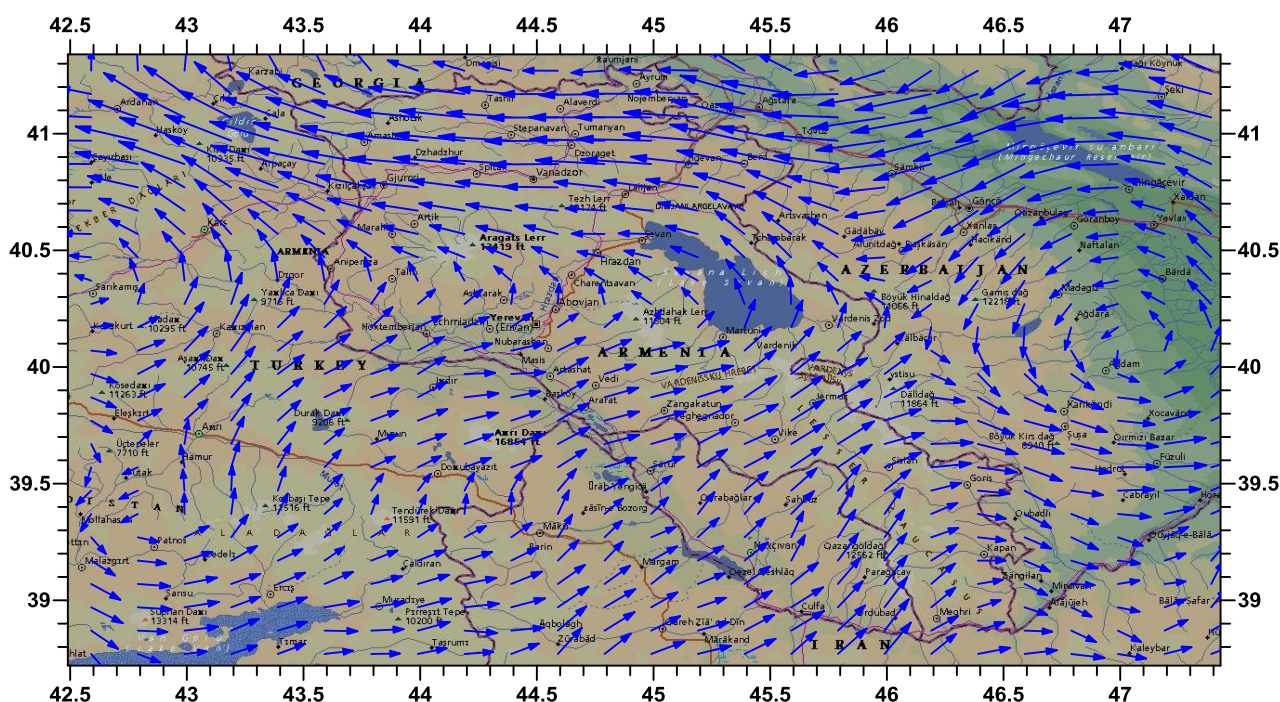


Рис. 5. Векторы горизонтальных сдвиговых напряжений на территории современной Армении и прилегающих к ней государств.

В заключение отметим, что проблема оценки сейсмических рисков – это проблема не одного государства. И выполняя оценки для какой-либо одной страны, мы неизбежно оцениваем сейсмические риски и для территории других государств. Таким образом, необходима кооперация научных исследований, международное сотрудничество специалистов самых разнообразных научных направлений.

Подчеркнём также, что, к сожалению, точный прогноз времени землетрясений и, в особенности, катастрофических землетрясений, на сегодняшний день остаётся тайной "за семью печатями", поскольку динамика опасных природных явлений до сих пор не укладывается в "прокрустово ложе" математики. Тем не менее, у автора есть все основания надеяться на то, что дальнейшие разработки в области изучения опасных геодинамических явлений позволят приблизиться к решению этой очень важной для всего человечества проблемы.

Литература

1. *Космическая* информация в геологии / Под ред. Трифонова В.Г., Макарова В.И. и др. М.: Наука, 1983. 536 с.
2. *Ананьин И.В.* Сейсмичность Северного Кавказа. М.: Наука, 1977. 148 с.
3. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Моделирование геоэкологического риска // Спецтехника и связь. 2009. № 2. С. 24-30.
4. *Данные* Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Москва. <http://www.wdcb.ru>.
5. *Сейсмологические* каталоги Геофизической службы РАН, Обнинск. Источник: Мировой Центр Данных по физике твердой Земли, Москва. <http://www.wdcb.ru>.
6. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Оценки геоэкологических рисков. Моделирование безопасности туристско-рекреационных территорий. М.: Финансы и статистика, изд. дом ИНФРА-М, 2009. 370 с.
7. *Минаев В.А., Фаддеев А.О., Данилов Р.М., Абрамова А.В., Павлова С.А.* Математическое моделирование сейсмических рисков // Спецтехника и связь. 2013. № 5. С. 58-63.
8. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Безопасность и отдых: системный взгляд на проблему рисков // В сборнике: Туризм и рекреация: Труды II Международной научно-практической конференции. 2007. С. 329-334.
9. *Минаев В.А., Фаддеев А.О.* Моделирование геоэкологических рисков и оценка геоэкологической безопасности на рекреационных территориях // Проблемы управления рисками в техносфере. 2008. Т. 8. № 4. С. 69-76.
10. *Прикладные* нечёткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. 368 с.