

ственно, что в этом случае землетрясения с глубиной гипоцентров больше 35 км определены быть не могли.

Нетрудно убедиться, что определение гипоцентров землетрясений разными службами и разными методами, по разным годографам и системам наблюдений дает различные результаты. В подтверждение данного факта достаточно изучить табл. 1 [4].

Таблица 1

Сводка параметров гипоцентра землетрясения 08.11.2005 по данным разных сейсмических служб [4]

Дата и время землетрясения: 08.11.2005, 06:27:11.7						
Сейсмическая служба	Полное название	Lat	Lon	Тип маг.	Mag	Глубина
NSSP	Национальная сейсмическая служба защиты, Ереван, Армения	40.983	44.933	ML	3.8	10.0
TIF	Грузинский сейсмический центр мониторинга, Тбилиси, Грузия	40.869	48.144	-	-	17.4
CSEM	Европейский средиземноморский сейсмологический центр, Франция	40.793	47.639	Mb	4.1	2.0
IDC	Международный центр данных, Вена, Австрия	40.838	47.476	Mb	4.0	24.9
MOS	Геофизическая служба РАН, Обнинск, регион Калуга, Россия	41.163	47.473	Mb	4.1	43.0
NEIC	Национальный информационный центр землетрясений, Геологическая служба США	40.622	47.528	Mb	4.1	84.1
NNC	Национальный центр данных, Алматы, Казахстан	41.364	48.309	-	-	14.5
ISC	Международный сейсмологический центр, Великобритания	41.067	47.617	Mb	3.9	33.0

Данные табл. 1 взяты из сайта Международного сейсмологического центра (ISC).

Из таблицы видно, что разные сейсмологические центры и службы при обработке одного и того же землетрясения получили разные результаты, что особенно ярко выражено в определении глубин. Таким образом, можно сделать следующие выводы: 1) глубины гипоцентров в основном определяются ненадежно; 2) для того чтобы отдать предпочтение какому-либо решению, необходимо провести дополнительные исследования.

Основные общеметодологические принципы теории и практики интерпретации сейсмологической информации целесообразно разбить на следующие этапы [5]:

1. Определение моментов вступлений сейсмических волн.
2. Определение распределения скоростей *P*- и *S*-волн.

3. Разработка эффективных алгоритмов определения координат гипоцентров землетрясений в неоднородных средах.

Обобщенный опыт показывает, что задача определения координат гипоцентров решается неформально и поэтому точность (устойчивость) результатов определения гипоцентра землетрясения зависит от точности отдельных этапов.

Аналогичная работа проведена по исследованию пространственно-временного развития сейсмического процесса в очаговых областях сильных землетрясений на примере Назарбекского землетрясения 11.12.1980 [6]. Показано, что кинематические параметры главного толчка и афтершоков, определенные различными сейсмологическими службами, отличаются друг от друга. В очаговой зоне Назарбекского землетрясения выявлены некоторые новые закономерности в физике наблюдаемого явления [6].

В [1] представлены результаты переопределения координат афтершоков Спитакского землетрясения по данным региональных станций за период 7.12.88-24.01.89. Обработка сейсмологического материала осуществлялась методом палеток изохрон Я.В. Ризниченко, построенных по годографам А. Саакяна для глубин очагов $H=5, 10, 15, 20, 25$ км. Как утверждают авторы, сопоставление координат афтершоков, полученных этим методом, с соответствующими определениями координат тех же афтершоков сейсмологами США и Франции, указывает на их близкое совпадение.

Для сравнительного анализа результатов обработки данных разными методами нами из каталогов и бюллетеней были взяты данные афтершоков, обработанные в [1]. В дальнейшем эти же афтершоки были обработаны нами с помощью программы Нуро_Vur [3] с использованием скоростной кривой, полученной в [7 – 9].

Для сравнения результатов мы отметили распределение гипоцентров в широтной и долготной плоскостях по результатам, полученным в [1] (рис. 1), по данным из каталога землетрясений Кавказа (рис. 2) и по программе Нуро_Vur [3, 9] (рис. 3).

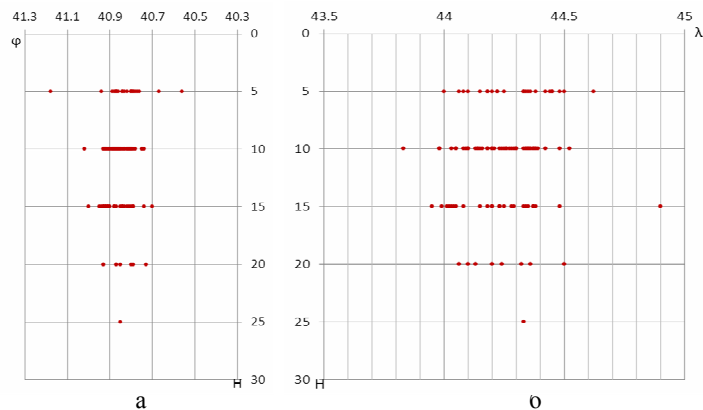


Рис.1. Распределение гипоцентров Спитакского землетрясения 1988 г. и его афтершоков в долготной (а) и широтной (б) плоскостях, по данным работы [1].

Из рис. 1 и 2 видно, что гипоцентры афтершоков, как и следовало ожидать, расположены на глубинах с дискретными значениями 0, 5, 10, 15, 20, 25 км.

На рис. 3 приведено распределение гипоцентров афтершоков Спитакского землетрясения в долготной и широтной плоскостях, полученное с помощью программы Нуро_Vur. Из рисунка видно, что афтершоковый процесс Спитакского землетрясения не такой компактный в пространстве, как это представлялось ранее [1, 10]. Он скорее похож на активизацию сейсмичности в регионе, охватывающем достаточно большую область как по площади, так и по глубине (вплоть до 110 км).

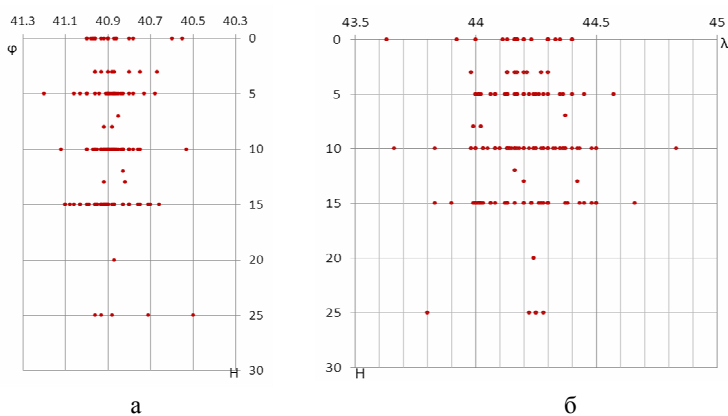


Рис.2. Распределение гипоцентров Спитакского землетрясения 1988 г. и его афтершоков в долготной (*a*) и широтной (*б*) плоскостях (по каталогам).

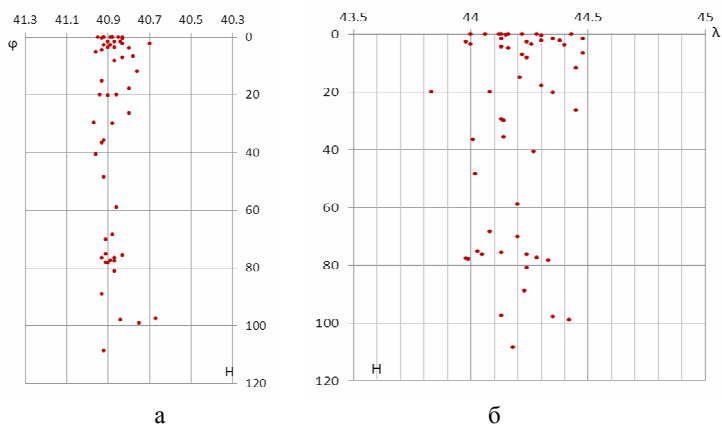


Рис.3. Распределение гипоцентров Спитакского землетрясения 1988 г. и его афтершоков в долготной (*a*) и широтной (*б*) плоскостях (после пересчета).

Существование глубоких очагов афтершоков Спитакского землетрясения является достаточно дискуссионным. Покажем, что очаги глубоких афтершоков действительно имеют место. Для этого нами построены экспериментальные годографы по данным работы [1], по данным каталога кавказских землетрясений [11] и по результатам, полученным после корректировки данных. Также были рассчитаны теоретические годографы для двух глубин очагов: 25 и 100 км. Все годографы нанесены на один график (рис. 4, 5).

Естественно, что выбор из множества решений единственного – новая задача, более сложная, чем первоначальная. На рис. 4 и 5 одинаковые исходные данные обработаны разными методами, и из графиков четко видно, что на рис. 5 разброс маленький, что и доказывает устойчивость решений по методу, полученному авторами статьи.

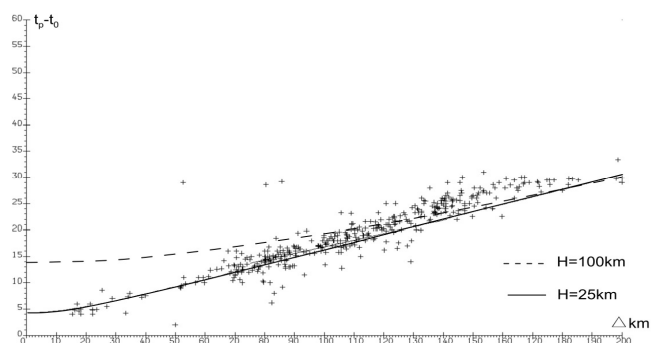


Рис. 4. Теоретический годограф для очагов землетрясений с глубиной 25 и 100 км и точки экспериментальных годографов, по данным работы [1].

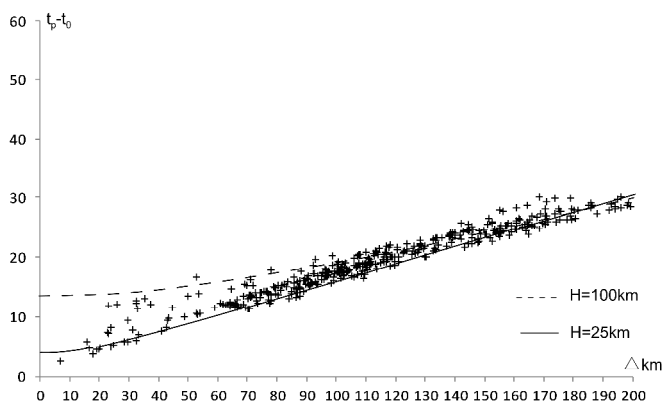


Рис. 5. Теоретический годограф для очагов землетрясений с глубиной 25 и 100 км и точки экспериментальных годографов после обработки

Из рис. 4 видно, что точки, соответствующие наблюдаемым событиям, согласно результатам [1] и каталога, имеют большие глубины, хотя представлены в упомянутых выше работах как события с малыми глубинами. При этом точки перегиба обоих годографов лежат на эпицентральных расстояниях 320 и 730 км, соответственно. Это означает, что определение глубины источников, расположенных на эпицентральных расстояниях меньше 300 км, определяется устойчиво [12]. А это, в свою очередь, говорит о том, что очаги этих событий действительно расположены на больших глубинах. Заметим, что часть точек, построенных по данным бюллетеней и каталогов, лежит гораздо ниже годографа от источника с нулевой глубиной. Последнее обстоятельство указывает на плохое качество данных, приведенных в каталогах и бюллетенях для отдельных событий.

Правильность определения времен вступления объемных волн контролировалась логикой графика Вадати. Для проверки этого утверждения мы построили график зависимости времени пробега продольных t_p-t_0 волн от пробега t_s-t_p фиктивных волн.

На рис. 6 приводятся результаты, полученные по данным работы [1], на рис.7 – по данным бюллетеней, на рис. 8 – после обработки данных времен вступлений продольных и поперечных волн.

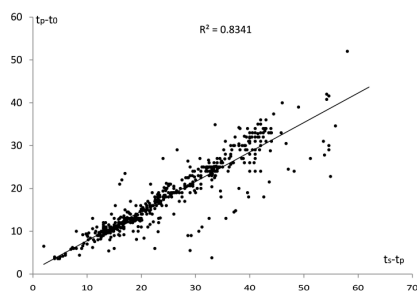


Рис. 6

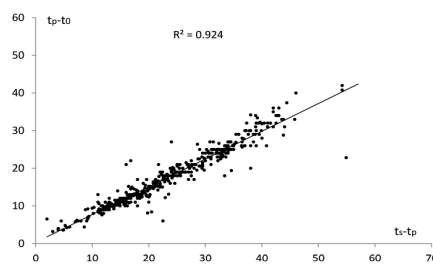


Рис. 7

Рис.6. График зависимости времен пробега продольных волн (t_p-t_0) от времен пробега фиктивных волн (t_s-t_p) Спитакского землетрясения и его афтершоков [1].

Рис.7. График зависимости времен пробега продольных волн (t_p-t_0) от времен пробега фиктивных волн (t_s-t_p) Спитакского землетрясения и его афтершоков, данные бюллетеней и каталога.

Их сравнение показывает, что самые неустойчивые результаты получены на рис. 6 [1], так как разброс очень большой, что свидетельствует о том, что время в очаге получено неправильно. Для доказательства этого факта вычислим коэффициент детерминации R^2 , который показывает долю общей вариации зависимой переменной, обусловленной регрессией или изменчивостью объясняющей переменной. R^2 принимает значения из интервала $[0;1]$. Чем ближе R^2 к 1, тем теснее наблюдения примыкают к линии регрессии и тем лучше регрессия описывает зависимость переменных. Коэффициент детерминации в данном случае $R^2=0.8341$, по дан-

ным бюллетеней $R^2=0.924$, а по данным результатов после нашей обработки $R^2=0.984$.

Для определения координат гипоцентров афтершоков Спитакского землетрясения нами были использованы данные о приходе сейсмических волн на 16 ближайших сейсмических станциях.

Всего в сейсмологические бюллетени вошли данные о 54 афтершоках за период с 07.12.1988, 07:41:25.7 по 15.12.1988, 23:15:45.0. Координаты гипоцентра основного толчка Спитакского землетрясения по уточненным данным равны: $\varphi=40.845^\circ$, $\lambda=44.150^\circ$, $h=5.0$ км. На рис.9,а показаны проекции распределения афтершоков Спитакского землетрясения на дневную поверхность, на рис.9,б – положение эпицентра его сновного толчка по различным данным [10].

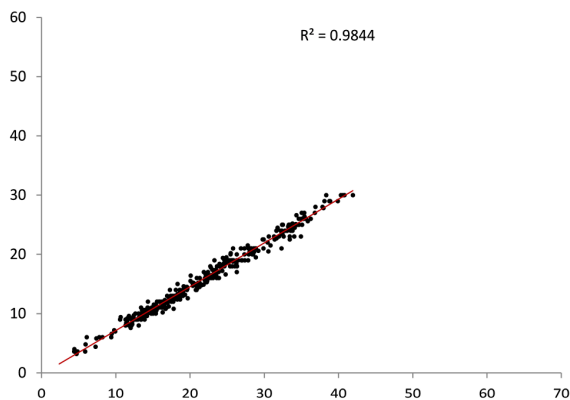


Рис.8. График зависимости времен пробега продольных волн ($t_p - t_0$) от времен пробега фиктивных волн ($t_s - t_p$) Спитакского землетрясения и его афтершоков, после пересчета.

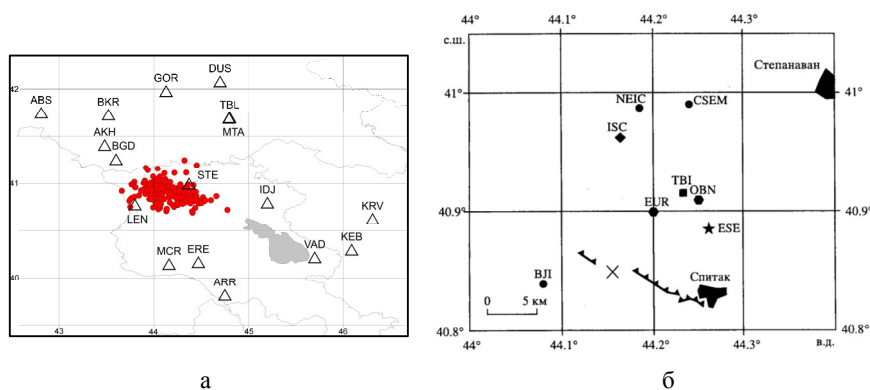


Рис.9. а – Распределение эпицентров афтершоков Спитакского землетрясения; б – положение эпицентра основного толчка Спитакского землетрясения по различным данным. Крестиком нанесено положение эпицентра в соответствии с нашим определением. Там же показаны выходы разрыва на поверхность.

Известно, что при определении координат гипоцентров с помощью компьютерной обработки минимизация функционала выполняется более точно и строго по сравнению с ручной обработкой. Следовательно, более устойчиво и надежно определяется положение очага. Необходимо обратить внимание на то, что в наших расчетах эти основные принципы обработки сейсмологической информации выполняются, что и доказывает правильность наших рассуждений.

Отметим также, что турецкая сейсмическая служба «Восточный Анатолийский исследовательский центр землетрясений – АТА» получила результаты определений глубин землетрясений на территории Армении больше 100 км (табл. 2). Эти данные также подтверждают правильность полученных результатов.

Таблица 2

Данные о глубоких землетрясениях Армении, зарегистрированные турецкой сейсмической службой [16-18]

Дата	Время	Широта	Долгота	Магнитуда, ML	Глубина, км
22-04-2014	11:22:23.9	40.192	43.644	2.0	127
23-04-2014	22:35:48.3	40.782	44.019	2.3	150
30-05-2014	01:28:32.7	40.082	44.12	3.1	111.8

Выводы. Показано, что афтершоковый процесс Спитакского землетрясения не такой компактный в пространстве, как это представлялось ранее. Он, скорее, похож на активизацию сейсмичности в регионе, которая охватывает достаточно большую область, как по площади, так и по глубине (вплоть до 110 км). Ранее глубокие землетрясения на территории Армении, и в частности афтершоки Спитакского землетрясения, не могли быть обнаружены, так как координаты гипоцентров определялись с использованием скоростных кривых или годографов до глубин, не превышающих 50 км. Если же мы хотим получить достоверную информацию о распределении гипоцентров землетрясений, то необходимо при их определении использовать данные о скоростях сейсмических волн или годографы до глубин порядка 700 км.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Р. Т. Джрбашяну за полезные рекомендации при написании статьи, непосредственное обсуждение и замечания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке МОН РА в рамках научного проекта № 18SH-1E012.

¹ Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова
НАН РА, Гюмри
e-mail: avet.andrey@mail.ru

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва

**А. М. Аветисян, В. Ю. Бурмин, Дж. К. Карапетян,
К. С. Казарян**

**Анализ результатов определения глубин афтершоков
Спитакского землетрясения**

Исследуется оценка точности пространственного распределения афтершокового процесса Спитакского землетрясения 07.12.1988 г. В связи с тем, что координаты гипоцентров главного толчка и афтершоков Спитакского землетрясения, определенные различными сейсмологическими службами, отличаются друг от друга, возникает вопрос оценки точности получаемых результатов и выявления надежного метода обработки сейсмологической информации. Проведен сравнительный анализ результатов обработки сейсмологической информации по данным работы Годзиковской – афтершоковый процесс Спитакской очаговой зоны по данным региональных станций за период 7.12.88-24.01.89, сейсмологической службы Кавказского регионального центра, а также результатов, полученных с помощью программы Hypo_Bur с использованием скоростной кривой. Показано, что использование программы Hypo_Bur и упомянутой выше скоростной кривой дает более точные результаты и может быть использовано при определении гипоцентров на территории Армении, и в частности при обработке сейсмологической информации очаговой зоны Спитакского землетрясения.

**Ս. Ս. Ավետիսյան, Վ. Յու. Բուրմին, Ջ. Կ. Կարապետյան,
Կ. Ս. Դազարյան**

**Սպիտակի երկրաշարժի հետցնցումային պրոցեսի հիպոկենտրոնների
որոշման արդյունքների վերլուծությունը**

Աշխատանքում ուսումնասիրվում է 07.12.1988թ. Սպիտակի երկրաշարժի հետցնցումային պրոցեսի տարածական բաշխվածության ճշտության գնահատականը: Սպիտակի երկրաշարժի գլխավոր ցնցման և հետցնցումների տարբեր սեյսմիկ ծառայություններով որոշված կինեմատիկ պարամետրերը տարբերվում են միմյանցից: Հետևաբար, հարց է առաջանում գնահատել ինչպես ստացված արդյունքների ճշտությունը, այնպես էլ սեյսմաբանական ինֆորմացիայի մշակման ալգորիթմների հուսալիությունը: Այդ նպատակով [1] աշխատանքի, Կովկասի սեյսմիկ ծառայության տարածքային կենտրոնի տվյալներով, ինչպես նաև Hypo_Bur ծրագրի և [9] աշխատանքի հոդոգրաֆի միջոցով ստացված արդյունքներով իրականացվել է սեյսմաբանական ինֆորմացիայի մշակման արդյունքների համեմատական վերլուծություն: Ապացուցվել է, որ Hypo_Bur ծրագրի և ստացված հոդոգրաֆի կիրառումը տալիս է առավել ճշգրիտ արդյունքներ և կարող է կիրառվել հիպոկենտրոնների որոշման, մասնավորապես Սպիտակի երկրաշարժի օջախային գոտու սեյսմաբանական ինֆորմացիայի մշակման դեպքում:

**A. M. Avetisyan, V. Yu. Burmin, J. K. Karapetyan,
K. S. Ghazaryan**

**Analysis of the Spitak Earthquake Aftershock Process
Hypocenters Definition Results**

The article explores estimation of the accuracy of the spatial distribution of the aftershock process of the Spitak earthquake 07.12.1988. The kinematic parameters of

the main shock and aftershocks of the Spitak earthquake, determined by many seismological services, differ from each other. Therefore, the question arises of evaluating the accuracy of the results obtained and identifying a reliable method for processing seismological information. For this purpose, a comparative analysis of the results of processing seismological information from the work data [1], Seismological Service of the Caucasian Regional Center, as well as the results obtained with the program *Нуро_Bur* with the hodograph of the work [9].

It is proved that the program *Нуро_Bur* and the hodograph give more accurate results and can be used to determine the hypocenters and when processing seismological information in the Spitak earthquake focal zone.

Литература

1. *Годзиковская А.А., Гедакян Э.Г., Товмасын А.К.* – Вулканология и сейсмология. 1990. Вып.32. С. 29-35.
2. *Левицкая А.Я., Лебедева Т.М.* Годограф сейсмических волн Кавказа. Квартальный сейсмический бюллетень. 1953. XXI. № 1-4, Тбилиси, 1953, с. 51-59.
3. *Бурмин В.Ю.* – Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 73–82.
4. http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=10224807&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE
5. *Аветисян А.М., Бурмин В.Ю., Манукян А.Г.* – Изв. НАН РА. Науки о Земле. 2012. Т. 65. № 3. С. 70-77.
6. *Якубов М.С., Соколов М.В.* В кн.: Матер. междунар. конф. «Сейсмичность Северной Евразии», посвященной 10-летию выпуска научных трудов «Землетрясения Северной Евразии». Обнинск. 2008. С. 351-353.
7. *Аветисян А.М., Казарян К.С.* – Изв. НАН РА. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 38-45.
8. *Бурмин В.Ю.* – Физика Земли. 2004. № 8. С. 34-40.
9. *Бурмин В.Ю., Аветисян А.М., Геворкян К.В.* – Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 68–78.
10. *Арефьев С.С.* Эпицентральные сейсмологические исследования. М. Академкнига, 2003. 375 с.
11. *Бурмин В.Ю., Аветисян А.М., Сергеева Н.А., Казарян К.С.* – Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. С. 11-17.
12. *Бурмин В.Ю.* – Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 62-71.
13. http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=606443422&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE
14. http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=606443467&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE
15. http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=606445143&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE