

Evidenze sismostratigrafiche di fenomeni da espulsione di fluidi, superficiali e profondi, nell'*offshore* tra Sciacca e Agrigento (Sicilia meridionale)

Seismic-stratigraphic evidences of surficial and buried fluid flow phenomena in the Sciacca - Agrigento offshore (Southern Sicily)

MANCUSO M.R.(*), CATALANO R.(**)

RIASSUNTO - In questa nota, viene segnalata la presenza di strutture da iniezione, indotte dalla risalita di fluidi presenti nel sottosuolo di fenomeni di fluidificazione di sedimenti poco consolidati all'interno delle successioni sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Deposizionale Quaternaria, stadio isotopico 5e (Pleistocene superiore-Olocene). All'interno delle associazioni formatesi in ambiente deltizio e litorale, l'apporto di sostanza organica dai fiumi e la rapida degradazione batterica di questa, potrebbero avere permesso la formazione di gas biogenici, che impregnano i depositi a vari livelli.

La combinazione di sovrappressioni indotte dalla rapida deposizione e l'impregnazione di gas avrebbe favorito l'insorgere di processi di liquefazione e fuoriuscita di fluidi, specie se in presenza di eventi sismici, compatibili con quelli registrati nella zona.

La compartimentalizzazione dei fenomeni identificati sarebbe stata legata al progressivo annegamento della piattaforma continentale, con il conseguente brusco spostamento verso terra degli ambienti deltizi. In più, la formazione di sezioni condensate sulla piattaforma avrebbe indotto la formazione di barriere di permeabilità, che sigillerebbero le strutture da iniezione e ne determinerebbero l'abbandono. Un ulteriore meccanismo di controllo potrebbe inoltre essere ricercato nel sistema di circolazione delle acque di fondo, che, nei settori di piattaforma esterna più prossimi al ciglio, dove le correnti MAW (Modified Atlantic Water) e LIW (Levantine Intermediate Water) si incontrano e incrementano la loro energia e turbolenza, controllando altresì variabilità e distribuzione delle forme di fondo.

PAROLE CHIAVE: fondale marino, emissione fluida, Sicilia meridionale, Pleistocene, Olocene, stratigrafia sismica, *pockmark*, diapiro di fango

ABSTRACT - In this paper, we discuss the various processes controlling the occurrence and the expression of gas seepage and shallow gas observable within the Transgressive and the

Highstand subaqueous deltas, pertaining to the Last Depositional Sequence, Late Pleistocene to Holocene in age, of the Southern Sicily continental margin, in the outer shelf to slope sectors of the Sciacca and Agrigento offshore. Here, different types of gas-escape related features have been documented. Separate, but genetically-linked, features are described on a grid of high-resolution seismic record: wide areas of acoustical turbidity, due to anomalous shallow gas concentrations, within the laterally extensive Holocene mud wedge; pockmarks and buried pockmarks occur singly or in organised arrays, associated with areas of steeper seabed gradient; and, at least, buried mud-diapirs, with an irregular shape.

The gas seepage-related features are spatially associated with the depocenters of the subaqueous deltas and this relationship suggests a correlation between flood deposition of terrigenous organic matter and shallow gas formation. Moreover, the interaction between shore-parallel southeastward-flowing bottom currents-hugging shelf currents and basin morphology may interact with the development of pockmarks over time, including elongation in the direction of current flow.

KEY WORDS: fluid emission, ocean floors, Southern Sicily, Pleistocene, Holocene, seismic stratigraphy, pockmark, mud lumps

1. - INTRODUZIONE

La formazione di strutture da iniezione, indotte dalla risalita di fluidi presenti nel sottosuolo ed i fenomeni di fluidificazione di sedimenti poco consolidati, sono fenomeni geologici ben conosciuti, sia in ambiente continentale sia in ambiente marino, che deformano o cancellano la stratificazione originaria delle successioni sedimentarie (ALLEN, 1982; HOVLAND & JUDD, 1988; MILKOV, 2000).

(*)Istituto per l'Ambiente Marino e Costiero (IAMC - CNR), USS di Mazara del Vallo, Via L. Vaccara, 61, 91026 - Mazara del Vallo (Tp)

(**)Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Via Archirafi 22, 90123, Palermo

Nel settore centrale del Mar Mediterraneo, le ricerche di cartografia geologica marina, i rilievi batimetrici ed i rilievi sismici ad alta risoluzione, le riprese video sottomarine ed i campionamenti delle successioni sedimentarie e della colonna d'acqua hanno mostrato come tali fenomeni siano estremamente diffusi e pervasivi: nel Mar Adriatico (GELETTI *et alii*, 2008); nel Mar Tirreno meridionale (ROVERE *et alii*, 2014); lungo la scarpata orientale della Sardegna (DALLA VALLE & GAMBERI, 2011); nel Canale di Sicilia (MINISINI *et alii*, 2007; TAVIANI *et alii*, 2013); nell'area del Plateau di Malta (HOLLAND *et alii*, 2003, SAVINI *et alii*, 2009; MICALLEF *et alii*, 2011).

In questa nota, viene segnalata la presenza di tali fenomeni in una limitata porzione del margine continentale della Sicilia meridionale, nei settori *offshore* tra Sciacca ed Agrigento, dove sono state individuate due estese aree caratterizzate da impregnazioni gassose, strutture da iniezione isolate (*pockmark*), sciami di *pockmark* elongati sepolti e strutture domiformi (*mud-diapirs*), anch'esse sepolte. Lo studio è stato eseguito su una maglia di profili di sismica ad altissima risoluzione, interpretati secondo i metodi di analisi della Stratigrafia sismica (PAYTON, 1977).

La segnalazione di questi fenomeni, all'interno delle unità sismiche appartenenti alle associazioni di sistemi deposizionali trasgressive e di stazionamento alto dell'Ultima Sequenza Deposionale Quaternaria, stadio isotopico 5e, formatasi durante gli ultimi 80 ka fino all'Attuale, suggerisce la possibilità di una interazione tra i processi di variazione del livello marino relativo, retrogradazione delle facies litorali e costiere, e variazioni della pressione idrostatica sui meccanismi di espulsione dei gas e dei fluidi, contenuti nelle successioni sedimentarie poco consolidate. Vengono inoltre considerati l'assetto strutturale e le condizioni oceanografiche.

2. - INQUADRAMENTO REGIONALE ASSETTO STRUTTURALE E STRATIGRAFICO

L'area studiata (fig. 1) è ubicata nella porzione centrale del margine continentale della Sicilia meridionale, nei settori di piattaforma esterna e di scarpata superiore dell'*offshore* tra Sciacca ed Agrigento, tra Capo San Marco e Licata e si estende tra le batimetriche dei -30 m e dei -200 metri di profondità.

Questa zona è l'espressione morfologica del prolungamento verso mare dell'elemento esterno del Sistema Embricato di Gela (*Gela Thrust System* in CATALANO *et alii*, 1996; CATALANO *et alii*, 1998), che degrada bruscamente verso l'attuale Bacino di Gela (*Gela Foredeep Basin* in CATALANO *et alii*, 1996; CATALANO *et alii*, 2013).

Verso sud, il Bacino di Gela è confinato dalle strutture estensionali della zona di rift del Canale di Sicilia, che comprende i bacini di Pantelleria, Malta e Linosa.

Come indicato dalle serie storiche e strumentali del Catalogo Parametrico dei Terremoti italiani (ROVIDA *et alii*, 2016), la sismicità dell'area è relativamente bassa, se comparata a quella di altre aree del Mediterraneo. Tuttavia, come sottolineato da MINISINI *et alii* (2007), gli eventi sismici registrati nell'area a partire dagli anni '70 del secolo scorso (due eventi sismici fino a 4,2 M), se estrapolati per intervalli temporali più lunghi (ovvero l'intervallo temporale fino alla fase di risalita successiva all'Ultimo Massimo Glaciale), mostrerebbe una frequenza di eventi significativa (60 eventi sismici ogni 1.000 anni, che corrisponderebbero a circa 2.000 eventi nell'intervallo post glaciale).

In quest'area sismicamente attiva, la sequenza sedimentaria del Pleistocene superiore-Olocene (Q.5.e in CATALANO *et alii*, 1998), ha registrato il ciclo glacio-eustatico degli ultimi 100 ka e la sua modulazione in cicli di 20 ka.

La sua architettura stratigrafica si compone di depositi di regressione forzata, depositi progredienti di stazionamento basso, depositi trasgressivi e di risalita (CATALANO *et alii*, 1998; MANCUSO *et alii*, 2011), appartenenti alle associazioni di sistemi deposizionali contemporanei del *Falling Stage* (FSST, 80 ka – 30 kyr b.P.), del *Lowstand* (LST, 30 ka – 18 ka b.P.), del *Transgressive* (TST, 15 ka – 6 ka b.P.) e dell'attuale *Highstand Systems Tract* (HST, 6 ka – 0 ka b.P.).

2.1. - MORFOLOGIA MARINA E CONDIZIONI OCEANOGRAFICHE

La piattaforma continentale della Sicilia meridionale (fig. 1), estesa fino a circa 16 km, è suddivisibile in due zone morfodinamiche: una di piattaforma interna, che si estende dalla costa sino all'isobata dei -50 m, ed una zona esterna, delimitata verso mare dal ciglio della piattaforma.

Significative rotture di pendio, che delimitano verso terra piccoli terrazzi d'abrasione marina, si individuano tra i -95 m/-110 m, e tra i -60 m/-80 m.

Il ciglio della piattaforma è ubicato a profondità variabili tra -90 m e -201 m. La sua continuità è interrotta da numerose indentazioni e condotti erosivi, ampi fino a 2 km e profondi sino ad un centinaio di metri, che alimentano i sistemi torbidi della scarpata inferiore. Profondità del ciglio e presenza delle indentazioni sembrano essere controllate dalla ancora attiva deformazione del Sistema Embricato di Gela.

La scarpata continentale, dai -100 m fino ai -500 m di profondità, mostra una notevole acclività (dai 5° agli 8°), con terrazzamenti e bacini pensili, interrotta da numerosi condotti erosivi e da scarpate di frana sottomarina, *mud flow* e frane rotazionali. Solchi erosivi (*moat*), strutture sedimentarie deposizionali ed erosive, quali *elongated-plastered drift* e *furrow*, sono stati individuate tra il ciglio della piattaforma e l'isobata dei -400 m.

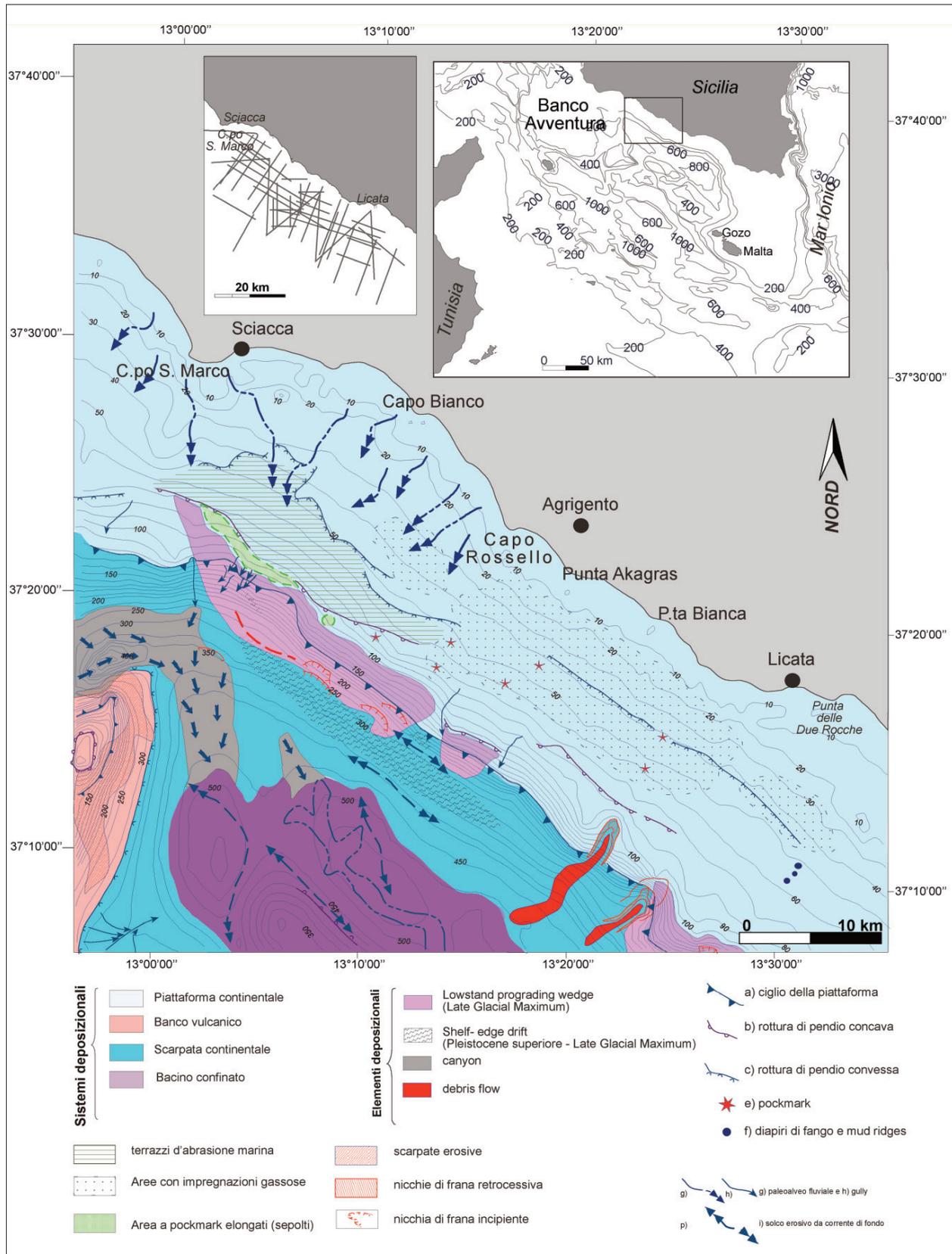


Fig. 1 – Schema morfologico dell'area di studio. Nei riquadri in alto, sono evidenziati il *grid* dei dati sismici utilizzati (in alto a sinistra) e l'ubicazione geografica (in alto a destra). La batimetria utilizzata deriva dal database GEBCO_2014.

– Morphological map of study area. On the top left, the index map of the data set, on the right, the geographic location of the study area. Bathymetry from GEBCO_2014 database.

Questo paesaggio sottomarino è attualmente modellato dalle correnti oceanografiche, innescate dal sistema di circolazione anti-estuarino del Mar Mediterraneo, caratterizzato dall'afflusso, verso est di acque superficiali a minore salinità di origine atlantica (*Modified Atlantic Water* - MAW, presenti nei primi 200 m della colonna d'acqua) e del concomitante *outflow*, in direzione opposta delle profonde e dense acque levantine (*Levantine Intermediate Waters* - LIW, ROBINSON *et alii*, 1999).

2.2. - DATI E METODOLOGIE D'ANALISI

I dati presentati sono stati raccolti in differenti campagne oceanografiche (1992, 1994, 1996) organizzate dall'Istituto di ricerca per l'Ambiente Marino Costiero, in collaborazione con l'allora Dipartimento di Geologia e Geodesia dell'Università di Palermo (ora Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare), con le strumentazioni convenzionali disponibili sulla N/O Urania del C.N.R. e durante le campagne sperimentali, condotte stagionalmente dal 1994 fino ad oggi, nell'ambito del "Programma Nazionale di Raccolta dei Dati Alieutici" e del Programma Internazionale "Medits".

Si tratta di un *set* multivariato di dati, che comprende profili *chirp* Sub-bottom 16 kHz, profili Sparker 1000 J e Sub-bottom a 3.5 kHz, registrati analogicamente a varie scale. Il posizionamento nave è stato effettuato con il sistema GPS in dotazione della N/O Urania ed il *datum* utilizzato è il WGS '84.

I dati raccolti tra il 1994 ed il 1996 nell'ambito del "Programma Nazionale di Raccolta dei Dati Alieutici" sono stati acquisiti, a bordo di imbarcazioni d'altura per la pesca commerciale con il sistema di posizionamento GPS, riferiti all'ellissoide WGS84.

L'applicazione dei paradigmi della Stratigrafia Sismica (PAYTON, 1977) ha permesso di ricostruire le relazioni geometriche e temporali delle unità sismiche, consentendo di ricostruire all'interno di uno schema cronostratigrafico, i vari sistemi deposizionali, definendone estensione areale ed evoluzione temporale

2.3. - DEFORMAZIONI DEI SEDIMENTI AD OPERA DI FENOMENI DI INIEZIONE E DEGASSAMENTO ENTRO I SISTEMI TRASGRESSIVI E DI STAZIONAMENTO ALTO

Nell'area studiata, nell'*offshore* della Sicilia meridionale, tra Capo San Marco e Licata, all'interno delle successioni sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Deposizionale Q.5.e (fig. 2), sono state riconosciute strutture verticali da iniezione (*pockmark*), sia nell'immediato sottofondo marino sia sepolte.

Le prime (fig. 3) appaiono come depressioni circolari isolate, di forma ad "U" o a "V" in sezione trasversale, localizzate tra i -40 m ed i -70 m di profondità.

La loro immagine sismica è un rilievo invertito, che interrompe la continuità dei riflettori, che sembrano uncinati verso il basso. Si tratta di strutture isolate di dimensioni discrete, con un diametro variabile tra i 77 m ed i 120 m, ed una profondità compresa tra i -5 m ed i -15 m, rispetto ai fondali circostanti. I fianchi delle depressioni non superano un'inclinazione di 3°.

Poichè si individuano a fondo mare, sono confinate ai riflettori più superficiali, non sono drappeggiate da sedimenti, né associate a strutture sepolte, è probabile che siano da interpretare come strutture attive in tempi recenti, sebbene non si abbiano evidenze sismostratigrafiche di degassamento attivo.

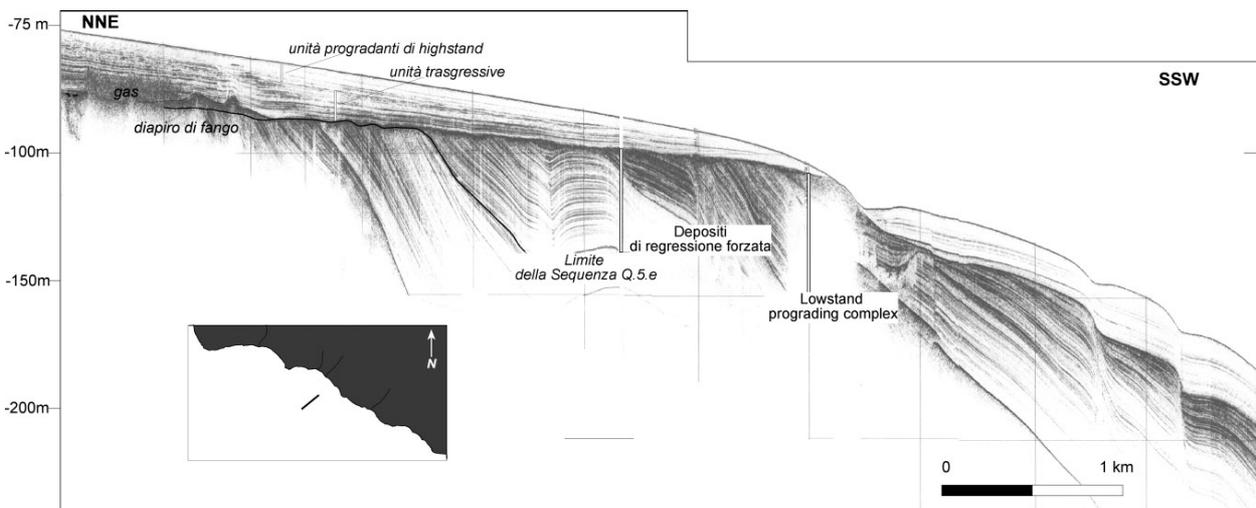


Fig. 2 – Profilo *chirp*, che mostra l'organizzazione della Sequenza Deposizionale Q.5.e (Pleistocene superiore – Olocene).
– *chirp* sonar profile showing the stratigraphic organization of the Q.5.e Depositional Sequence (late Pleistocene to Holocene, in age).

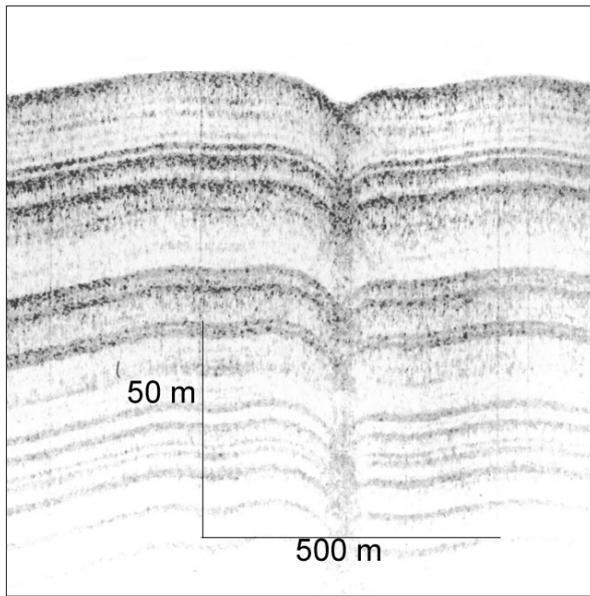


Fig. 3 – Immagine sismica di un *pockmark*, individuato a largo di Punta Bianca, a circa -60 m di profondità.
 – Seismic image of a low profile *pockmark*, located at -60 m of water depth, off Punta Bianca.

Sono di norma localizzate a valle dei depositi con impregnazioni gassose.

Gli sciame di *pockmark* sepolti (fig. 4), presenti all'interno delle unità sismiche del TST, mostrano peculiarità più interessanti.

Sono strutture di forma più articolata, elongate, con diametri, che possono raggiungere i 150 m e profondità massime di 25 m. Sono stati individuati all'interno delle unità sismiche del TST, caratterizzate da forme esterne a cuneo, delimitate alla base da superfici di erosione (*ravinement surface*) e al tetto da superfici di *toplap*, in corrispondenza di un substrato deformato e fagliato, troncato superiormente dal limite di sequenza Q.5.e. La presenza di geometrie sigmoidali dei riflettori sottilmente stra-

tificati, l'esistenza di aree di torbidità acustica e la distribuzione areale parallela a costa, fa interpretare tali unità sismiche come delta subacquei, in accordo con CATTANEO *et alii* (2003), caratterizzati dalla presenza di sedimenti sottili, ricchi di materia organica.

Gli sciame di *pockmark* sepolti sono stati riconosciuti tra i -80 m ed i -130 m di profondità (rispetto al fondo mare), laddove le coperture dei depositi di *highstand* sono più sottili, a monte delle rientranze del ciglio della piattaforma.

La direzione delle linee di fuga è generalmente obliqua e la propagazione avviene attraverso l'intero spessore dell'unità, per terminare bruscamente in corrispondenza dei *pockmark*. Lo spostamento verso terra dei depocentri delle unità deltizie, indotto dal progressivo sollevamento del livello del mare, e la formazione di sezioni condensate sulla piattaforma esterna, segnano la fase di abbandono dei *pockmark*.

L'obliquità delle linee di migrazione dei fluidi potrebbe essere correlata alla presenza di correnti di fondo dominanti, che deflettevano, all'atto dell'espulsione, i pennacchi di gas all'interno della colonna d'acqua in direzione SE.

All'interno dello stesso TST, a largo di Capo Akragas, non sono stati identificati *pockmark* elongati sepolti, ma strutture domiformi (fig. 1), con diametro compreso tra 450 m e 780 m, con una altezza variabile tra i 25 m ed i 38 m, interpretate come diapiri di fango o *mud ridge*, il cui sviluppo - probabilmente concomitante con le strutture su descritte - deforma intensamente i depositi del TST.

3. - CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I dati sismostratigrafici disponibili sulla piattaforma continentale dell'*offshore* della Sicilia meridionale, compreso tra Capo San Marco e Licata, hanno mostrato come all'interno delle successioni

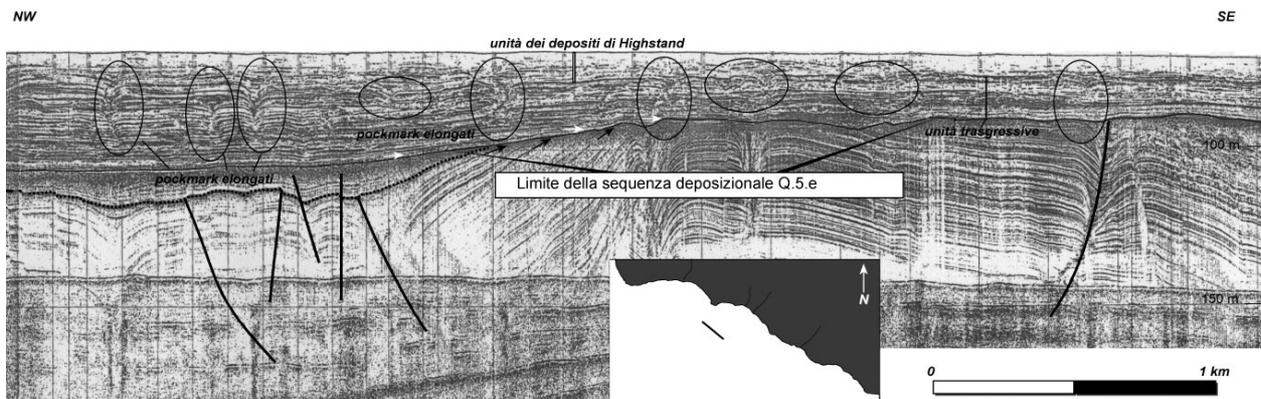


Fig. 4 – Immagine sismica degli sciame di *pockmark* sepolti, individuati a circa -80 m di profondità, nel settore di piattaforma esterna a largo di Capo San Marco e Capo Bianco.
 – Seismic image of a swarm of elongated buried *pockmark*, located at -80 m of water depth, in the outer shelf sectors off Capo San Marco and Capo Bianco.

sedimentarie, riconducibili alle associazioni di sistemi deposizionali di stazionamento alto e trasgressive della Sequenza Deposizionale Q.5.e, siano presenti strutture da iniezione superficiali e sepolte, aree con impregnazioni gassose e strutture domiformi, interpretate come diapiri di fango.

All'interno delle associazioni trasgressive e di stazionamento alto, formatesi in ambiente deltizio e litorale, l'apporto di sostanza organica dai fiumi e la rapida degradazione batterica di questa, hanno permesso la formazione di gas biogenici, che impregnano i depositi a vari livelli.

La combinazione di sovrappressioni indotte dalla rapida deposizione e l'impregnazione di gas può avere favorito l'innescio di processi di liquefazione e fuoriuscita di fluidi, specie se in presenza di eventi sismici, compatibili con quelli registrati nella zona.

La compartimentalizzazione dei fenomeni identificati è legata al progressivo annegamento della piattaforma continentale, con il conseguente brusco spostamento verso terra degli ambienti deltizi. La formazione di sezioni condensate sulla piattaforma indurrebbe la formazione di barriere di permeabilità, sigillando le strutture da iniezione e determinandone l'abbandono.

Un ulteriore meccanismo di controllo può inoltre essere ricercato nel sistema di circolazione delle acque di fondo, che, nei settori di piattaforma esterna più prossimi al ciglio, dove MAW e LIW si incontrano, incrementano la loro energia e turbolenza, controllando altresì variabilità e distribuzione delle forme di fondo.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN J.R.L. (1982) – *Sedimentary structures: Their character and physical basis*. Elsevier, New York, 663 pp.
- CATALANO R., DI STEFANO E., INFUSO S., SULLI A., VAIL P. R. & VITALE F.P. (1998) – *Sequences and systems tracts calibrated by high-resolution bio-chronostratigraphy: the Central Mediterranean Plio-Pleistocene record*. In: DE GRACIANSKY (Ed.): *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*. SEPM Special Publication, **60**: 155-177.
- CATALANO R., DI STEFANO P., SULLI A. & VITALE F.P. (1996) – *Paleogeography and structure of the Central Mediterranean: Sicily and its offshore area*. *Tectonophysics*, **260**: 291-323.
- CATALANO R., VALENTI V., ALBANESE C., ACCAINO F., SULLI A., TINIVELLA U., GASPARO MORTICELLI M., ZANNOLA C. & GIUSTINIANI M. (2013) – *Sicily's fold-thrust belt and slab roll – back: the SIRIPRO seismic crustal transect*. *Journ. Geol. Soc.*, **170**: 451-464.
- CATTANEO A., CORREGGIARI A., LANGONE L. & TRINCARDI F. (2003) – *The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf. sediment pathways and supply fluctuations*. *Mar. Geol.*, **193**(1): 61-91.
- DALLA VALLE G. & GAMBERI F. (2011) – *Pockmark and seafloor instability in the Olbia continental slope (northeastern Sardinian margin, Tyrrhenian Sea)*. *Mar. Geophys. Res.*, **32**: 193-205.
- GELETTI R., DEL BEN A., Busetti M., RAMELLA R. & VOLPI V. (2008) – *Gas seeps linked to salt structures in the Central Adriatic Sea*. *Basin Research*, **20**(4): 473-487.
- HOLLAND C.W., ETIOPE G., MILKOV A.V., MICHELOZZI E. & FAVALI P. (2003) – *Mud volcanoes discovered offshore Sicily*. *Mar. Geol.*, **199**: 1-6.
- HOVLAND M. & JUDD A. G. (1988) – *Seabed Pockmarks and Seepages*. Graham and Trotman, London, 293 pp.
- MANCUSO M., AGATE M., FALLO L., VACCARO F. & CATALANO R. (2011) – *Stratigraphic and morphological evidences of the last cycle of relative sea-level changes, some examples from the Late Pleistocene to Holocene sedimentary succession in the Sicilian offshore*. In: BRUGNOLI E., CAVARETTA G., MAZZOLA S., TRINCARDI F., RAVAIOLI M. & SANTOLERI R. (2011): *Marine Research at CNR*, Volume DTA/06 - 2011, 721-740.
- MICALLEF A, BERNDT C. & DEBONO G. (2011) – *Fluid flow systems of the Malta Plateau, Central Mediterranean Sea*. *Mar. Geol.*, **284**(1-4): 74-85.
- MILKOV A. V. (2000) – *Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates*. *Mar. Geol.*, **167**: 29-22.
- MINISINI D., TRINCARDI F., ASIOLI A., CANU M. & FOGLINI F. (2007) – *Morphologic variability of mass-transport deposits on the eastern slope of Gela Basin (Sicily Channel)*. *Basin Research*, **19**: 217-240.
- PAYTON C.E. (Ed.) (1977) – *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa, OK: American Association of PETROLEUM GEOLOGISTS, **26**: 1-516.
- ROBINSON A.R., SELLSCHOPP J., WARN-VARNAS A., LESLIE W.G., LOZANO C.J., HALEY JR P.J., ... & LERMUSIAUX P.F. J. (1999) – *The Atlantic ionian stream*. *Journal of Marine Systems*, **20**(1-4), 129-156.
- ROVERE M., GAMBERI F., MERCORELLA A., RASHED H., GALLERANI A., LEIDI E., MARANI M., FUNARI V. & PINI G.A. (2014) – *Venting and seepage systems associated with mud volcanoes and mud diapirs in the southern Tyrrhenian Sea*. *Mar. Geol.*, **347**: 153-171.
- ROVIDA A., LOCATI M., CAMASSI R., LOLLI B. & GASPERINI P. (2016) – *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.
- SAVINI A., MALINVERNO E., ETIOPE G., TESSAROLO C. & CORSELLI C. (2009) – *Shallow seep-related feature along the Malta Plateau (Sicily Channel - Mediterranean Sea): Morphologies and geo-environmental control on their distribution*. *Mar. Pet. Geol.*, **26**: 1831-1848.
- TAVIANI M., ANGELETTI L., FOGLINI F., FROGLIA C. & TRINCARDI F. (2013) – *The Gela Basin pockmark field in the Strait of Sicily (Mediterranean Sea). chemosymbiotic faunal and carbonate signatures of postglacial to modern cold seepage*. *Biogeosciences*, **10**: 4653-4671.